nouveau

# Microméga

# Physique - Chimie

## Tle S

### enseignement spécifique

## Livre du professeur


Sous la direction de

**Stanislas Antczak**
Lycée Parc Chabrières, Oullins
et
**Jean-François Le Maréchal**
École normale supérieure de Lyon

**Estelle Barbe**
Lycée Victor Hugo, Besançon

**Romain Barbe**
Lycée Victor Hugo, Besançon

**Pascal Bottos**
Lycée Charles Baudelaire, Cran-Gevrier

**Karine Braganti**
Lycée La Martinière Monplaisir, Lyon

**Laure-Lise Chapellet**
École normale supérieure de Lyon

**Patrick Charmont**
Lycée Aux Lazaristes, Lyon

**Didier Coince**
Lycée Parc Chabrières, Oullins

**Christophe Encrenaz**
Lycée Charles Baudelaire, Cran-Gevrier

**Ghislain Garcia**
Lycée Jean Vilar, Villeneuve-lez-Avignon

**Myrtille Gardet**
Lycée Prins Henrik, Copenhague, Danemark

**Claudine Grasset**
Lycée Marcel Sembat, Vénissieux

**Michel Peiron**
Lycée Parc Chabrières, Oullins

**Sarah Roques**
Lycée A. de St Exupéry, Lyon et lycée J. Perrin, Lyon

**Mélanie Roux**
Lycée René Char, Avignon

**Claude Tournus**
Lycée Frédéric Faÿs, Villeurbanne

**Anna Venancio Marques Serra**
École normale supérieure de Paris



Hatier

Conception maquette : Graphismes
Édition : Marilyn Maisongrosse et Marion Jammet
Mise en page et schémas : STDI-Graphismes

© HATIER, Paris, 2012 – ISBN 978-2-218- 95395-8

« Sous réserve des exceptions légales, toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, faite, par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par le Code de la Propriété Intellectuelle. Le CFC est le seul habilité à délivrer des autorisations de reproduction par reprographie, sous réserve en cas d'utilisation aux fins de vente, de location, de publicité ou de promotion de l'accord de l'auteur ou des ayants droit. »

# Sommaire


**Avant-propos** 5

**Chapitre d'introduction** Mesures et incertitudes 11

**Partie 1** Observer ONDES ET MATIÈRE

**Chapitre 1** Ondes et particules 21
**Chapitre 2** Ondes périodiques. Acoustique 31
**Chapitre 3** Propriétés des ondes 41
**Chapitre 4** Analyse spectrale 55

**Partie 2** Comprendre LOIS ET MODÈLES

**Chapitre 5** Les outils de la mécanique classique 67
**Chapitre 6** Mouvements dans un champ uniforme 81
**Chapitre 7** Mécanique céleste et mouvements de satellites 95
**Chapitre 8** Travail et énergie mécanique 107
**Chapitre 9** Oscillateurs et mesure du temps 119
**Chapitre 10** Temps et relativité restreinte 127
**Chapitre 11** Temps et évolution chimique 133
**Chapitre 12** Représentation spatiale des molécules 147
**Chapitre 13** Transformations en chimie organique 165
**Chapitre 14** Réactions acido-basiques 177
**Chapitre 15** Bilans thermiques 191
**Chapitre 16** Introduction à la physique quantique 201

**Partie 3** Agir DÉFIS DU XXIe SIÈCLE

**Chapitre 17** Enjeux énergétiques et chimie durable 209
**Chapitre 18** Dosages par étalonnage 217
**Chapitre 19** Dosages par titrage 231
**Chapitre 20** Synthèses organiques 243
**Chapitre 21** Signaux analogiques et numériques 257
**Chapitre 22** Transmissions de l'information 273

**Épreuve expérimentale de bac** 283

**Exercices de bac de synthèse** 291

# Avant-propos

## Présentation du livre du professeur

Ce livre du professeur a pour vocation d'accompagner l'enseignant dans son usage du *Nouveau Microméga* d'enseignement spécifique de Terminale S. L'essentiel est constitué des réponses aux questions posées, que ce soit dans les exercices qui ne sont pas déjà corrigés dans le manuel élève, ou dans les activités documentaires ou expérimentales. Cet ouvrage d'accompagnement contient également de nombreux commentaires, de diverses natures : explication des interprétations du programme, justification des choix effectués dans le manuel, compléments d'ordre pédagogique, scientifique ou technique.

L'aide apportée par ces commentaires permet à l'enseignant de trouver des fils directeurs dans chaque chapitre, de savoir sur quoi il faut insister et de tirer le meilleur parti des activités proposées dans le livre.

Ce livre du professeur reprend le découpage en chapitres du manuel élèves.

Pour chaque chapitre, une introduction générale donne le contexte du chapitre et les choix pédagogiques. Suivent les corrigés des activités avec, à chaque fois, un paragraphe introductif, la correspondance avec le programme et les corrigés. Viennent ensuite les corrigés des exercices.

## Le programme de physique-chimie de Terminale S à partir de la rentrée 2012

Le manuel d'enseignement spécifique *Nouveau Microméga* est en tout point conforme au nouveau programme défini dans le Bulletin officiel de l'Éducation nationale du 13 octobre 2011. L'ordre en est globalement respecté, ainsi que le découpage en parties *Observer*, *Comprendre*, *Agir*.

Ce programme, s'inscrivant dans la continuité du programme de Première S, comporte néanmoins quelques nouveautés.

• Il contient, dans une annexe qui précède les contenus du programme proprement dits, une liste de compétences expérimentales relatives aux incertitudes de mesure. Nous avons estimé qu'ainsi mises en avant, ces compétences nécessitaient un traitement spécial.

• Il contient de nombreuses compétences libellées « Extraire et exploiter des informations sur… ». Ces compétences font suite à celles de Première S qui étaient rédigées différemment : « Recueillir et exploiter des informations sur… ».

La différence tient probablement au fait que, dans un contexte d'examen, le recueil d'informations ne se fait qu'avec des documents déjà fournis, donc requiert que le candidat ait des compétences pour en extraire de l'information.

• Enfin, l'enseignement spécifique de physique-chimie de Terminale S occupe cinq heures hebdomadaires et non plus trois comme en Seconde et Première S ; le contenu est donc considérablement accru, de par toutes ses composantes : l'aspect documentaire, mais aussi l'aspect calculatoire (notamment dans la partie mécanique) et l'aspect conceptuel (RMN, mécanismes en chimie organique…).

Le maître mot de ce programme nous a semblé être l'autonomie de l'élève.

Le manuel *Nouveau Microméga* est ainsi conçu avec cette idée d'autonomie et d'acquisition de méthodes.

## Découpage en chapitres du manuel

Le découpage du manuel respecte globalement l'ordre du programme. Certains de nos choix peuvent ne pas aller de soi et méritent d'être explicités.

### Chapitre introductif

Les compétences expérimentales relatives à l'annexe *Mesures et incertitudes* sont mises en avant dans le programme officiel. Aussi nous a-t-il paru nécessaire de les traiter dans un chapitre à part, plutôt que de les restreindre à quelques fiches-méthodes. En effet, le programme se place clairement dans une *perspective de compréhension des bases de la métrologie*, ce qui nous a incité à expliquer les notions élémentaires liées aux incertitudes dans un cours, et pas seulement à enseigner la méthode des calculs d'incertitudes. Ce chapitre est structuré comme les autres : activités, cours, essentiel, tests, exercice résolu et exercices d'application directe. Il peut donc faire l'objet d'un enseignement à part entière, comme préalable aux autres chapitres. Les connaissances requises sont celles des années précédentes. Toutefois, il est également conçu pour être utilisé au fil du traitement des autres chapitres, comme une fiche-méthode. L'activité 1 peut constituer un complément aux activités du chapitre 1, l'activité 2 peut être traitée avec l'un des chapitres de chimie des solutions (14, 18 ou 19). L'enseignant peut même envisager de faire travailler l'élève en autonomie avec ce chapitre pour, ensuite, faire appel ponctuellement aux compétences qui y sont développées.

### Observer

Le chapitre 1 regroupe les aspects documentaires sur les ondes et les particules, ainsi que la relation entre retard, distance et célérité : il constitue ainsi une introduction simple à cette partie sur les ondes. Dans un souci de progressivité (notamment calculatoire), les notions un peu plus élaborées ne sont introduites qu'au chapitre 2 : fréquence et longueur d'onde pour les ondes périodiques, analyse spectrale d'un son musical, niveau sonore. Le chapitre 3 regroupe les propriétés des ondes (diffraction, interférences, effet Doppler) pour lesquelles peu de compétences calculatoires sont requises, mais plusieurs compétences expérimentales le sont. Le chapitre 4 d'analyse spectrale (UV-visible, IR et RMN) est résolument axé sur la chimie organique. Bien que dans la partie *Observer*, il apporte cependant des éléments liés à la compréhension des principes de chaque spectroscopie, même si l'approche théorique reste superficielle.

### Comprendre

Cette partie est vaste et disparate du point de vue des contenus. Un gros bloc de mécanique, associé à de la cinétique chimique, suivi de chimie organique, de chimie des acides et bases, de thermodynamique et de physique quantique. Le manuel juxtapose donc les chapitres dans l'ordre du programme, hormis en mécanique, pour laquelle le découpage choisi permet une progressivité dans l'enseignement.

Dorénavant, l'élève arrive en Terminale S en sachant peu de choses en mécanique. Les connaissances de Seconde sont déjà loin ; celles de Première S portaient uniquement sur l'énergie. L'élève doit donc entrer dans un formalisme nécessitant une grande rigueur calculatoire, sans y être préparé. Entre toutes, cette partie du programme est celle qui prépare le plus l'élève à l'enseignement supérieur en physique-chimie.

Pour prendre en compte ces spécificités, nous avons accordé une large place à ces chapitres de mécanique, d'où un découpage en six chapitres. Le chapitre 5 pose les bases de cinématique et de dynamique et comporte des exercices qui n'empiètent pas sur les contenus des deux chapitres suivants. Ce chapitre 5 est volontairement développé, davantage peut-être que ce que nécessiterait la lecture stricte du programme : il donne ainsi de la matière à l'enseignant désireux de travailler, de manière approfondie, les bases de la mécanique, que ce soit à l'aide d'activités expérimentales ou documentaires, ou à l'aide d'exercices de tous niveaux. Les deux chapitres suivants sont conçus comme des applications du chapitre 5. Le chapitre 6 traite de manière détaillée des mouvements dans un champ uniforme. Le chapitre 7 regroupe propulsion à réaction, mouvement circulaire d'un satellite et lois de Kepler. Ces trois chapitres constituent un bloc que l'enseignant peut choisir de découper autrement.

Les deux chapitres suivants regroupent les aspects énergétiques. Là encore, deux temps sont distingués : les bases de l'énergétique pour le chapitre 8, n'empiétant pas sur le chapitre 9, où ces bases sont appliquées à l'étude des oscillateurs. Ce chapitre 9 contient également tout ce qui est relatif à la mesure du temps classique et constitue ainsi un préalable au chapitre suivant. Le chapitre 10 clôt cette série de chapitres de mécanique par la notion de relativité du temps.

Les chapitres 11 à 16 respectent strictement l'ordre du programme et proposent des contenus largement indépendants. Certains introduisent des notions nouvelles pour la Terminale, comme la stéréochimie au chapitre 12, avec la chiralité, la stéréoisomérie, etc. et les mécanismes réactionnels au chapitre 13, incluant l'utilisation des flèches courbes pour désigner les formations et les ruptures de liaisons.

## Agir

La partie *Agir* est également disparate du point de vue des contenus. Nous avons choisi là encore de respecter globalement l'ordre du programme, tout en garantissant une progressivité dans la difficulté.

Le chapitre 17 regroupe des questions d'enjeux énergétiques, en lien avec le chapitre 15 et les connaissances de Première S par rapport auxquels il n'apporte pas de nouvelles notions, mais en utilise de nombreuses dans le contexte de la chimie durable.

Une large place, dans le manuel, est accordée aux chapitres 18 et 19, relatifs aux dosages par étalonnage et par titrage qui, pourtant, n'occupent que quelques lignes dans le programme. Les compétences exigibles sont essentiellement expérimentales, mais sous-tendent des connaissances nombreuses, notamment ce qui concerne l'équivalence d'un titrage. Ces notions faisaient l'objet, dans les anciens programmes, d'une grosse part des années de Première S et Terminale S et les difficultés des élèves relatives à ces notions sont bien connues. Aussi les contenus de ces deux chapitres donnent-ils suffisamment de matière à l'enseignant pour prendre en compte les besoins des élèves. Mais il peut également les regrouper.

Le chapitre 20 traite de synthèses organiques, et ouvre la porte à des notions aussi nouvelles et délicates que la sélectivité d'un réactif ou la stratégie de synthèse mettant en jeu des groupes protecteurs.

Enfin, un bloc de deux chapitres, 21 et 22, traite de la transmission et du stockage des informations. Nous avons regroupé tout ce qui concerne la transmission dans le chapitre 22, pour garder en chapitre 21 les notions fondamentales de signaux analogiques ou numériques, de leur conversion, du cas particulier des images numériques et des aspects liés au stockage.

Le bloc *Créer et Innover* figurant à la fin de cette partie *Agir* ne fait pas l'objet, dans le manuel d'enseignement spécifique *Nouveau Microméga*, d'un chapitre à part entière. Nous avons choisi de le traiter au fil de l'ensemble des chapitres, notamment à travers des derniers exercices de chaque chapitre, en faisant appel aux compétences de rédaction de synthèse de documents. Nous avons conçu ces exercices et leurs corrigés autour de l'utilisation de mots-clés que l'élève devra utiliser de façon pertinente. La fiche-méthode n° 14 fournit des outils pour exploiter au mieux ses connaissances dans le cadre de ce type d'évaluation nouvelle annoncée pour le Bac.

# Utilisation du manuel

Le préambule du programme précise que le découpage en parties *Observer*, *Comprendre*, *Agir*, n'est pas contraignant, et que l'enseignement peut être articulé de diverses manières. Nous avons conçu le *Nouveau Microméga* pour qu'il soit adapté à des usages variés. L'enseignant ne devra pas hésiter à se l'approprier pour organiser sa propre progression.

Il pourra, par exemple, regrouper les chapitres 8, 9, 15 et 17 pour faire un bloc balayant les différents aspects énergétiques figurant au programme. Il pourra rapprocher le chapitre 16 (laser et dualité onde-particule) des chapitres 1, 2, 3 et 4 traitant des ondes. Il pourra regrouper également les chapitres 14, 18 et 19 en début d'année, attendu que les compétences de chimie des solutions (notamment les titrages) sont nécessaires au traitement d'une partie de l'enseignement de spécialité.

Il pourra choisir de traiter en début d'année la partie conversion analogique-numérique du chapitre 21, considérant qu'elle permet de comprendre le fonctionnement des systèmes d'acquisition utilisés par la suite.

Ces exemples ne sont qu'un aperçu des différentes possibilités qu'offrent non seulement le programme, mais aussi le manuel, conçu comme un outil souple et modulable. Le programme utilise à cinq reprises la notion de *fil rouge* pour désigner cette liberté laissée à l'enseignant de créer des liens privilégiés entre certains chapitres en associant les chapitres à sa guise.

## Contenu des chapitres

Chaque chapitre est conçu de la même manière.

• **Pour démarrer le chapitre**, des tests de prérequis sont proposés pour être traités en totale autonomie par l'élève : ils sont intégralement corrigés en fin de manuel, de manière détaillée lorsque cela s'avère nécessaire. L'enseignant pourra encourager les élèves à s'en saisir. Ils regroupent des tests purement mathématiques et des tests de physique-chimie. La mise en avant des compétences mathématiques est le signal, pour l'élève, que la physique et la chimie ne peuvent être dissociées d'un aspect calculatoire, même minimaliste.

• Les **Objectifs du chapitre** regroupent les compétences relatives au chapitre.

• Les **Activités** permettent toutes des usages divers. À l'enseignant de les intégrer dans son enseignement. Toutes sont sur le même modèle : un objectif affiché relativement au programme, le contenu proprement dit et, en marge, un bloc **Aides et méthodes** rédigé pour aider un élève travaillant en autonomie. Elles sont de deux types :

- les **Activités documentaires** sont diverses, tant sur leur type que sur leur usage. Certaines sont conçues pour être traitées avant le cours, d'autres pour être traitées en application, d'autres pour remplacer le cours. Certaines peuvent être traitées à la maison en autonomie par l'élève, alors que d'autres nécessitent une réflexion collective en classe. Certaines, repérées par le logo *Analyse d'expérience*, constituent une alternative aux travaux pratiques, par exemple lorsque les manipulations sont dangereuses ou requièrent du matériel coûteux. Certaines, repérées par le logo *Histoire des Sciences*, peuvent constituer un prolongement culturel en interaction avec d'autres disciplines.
- les **Activités expérimentales** varient, en durée et en usage. Notre volonté a été d'en proposer aussi souvent que possible, y compris parfois lorsque le programme n'en sollicite pas. Elles sont conçues de manière à requérir le moins possible de matériel spécifique et coûteux. Des blocs *Protocole* sont nettement séparés des blocs de questions, ce qui permet de distinguer le travail expérimental du travail d'exploitation, de manière éventuellement à permettre à l'élève de terminer l'exploitation à la maison (si le temps manque par exemple). Il arrive que l'activité expérimentale soit reliée à certains des sujets d'épreuve expérimentale type bac figurant en fin de manuel, auquel cas cela est signalé par un renvoi.

• Le **Cours** est présenté à la suite des activités, même si, parfois, certaines notions du cours sont requises pour les traiter. Les cours du manuel d'enseignement spécifique *Nouveau Microméga* sont conçus de manière à organiser le travail de l'élève, en complément de l'enseignement de son professeur. Ils sont détaillés, mais clairement centrés sur les notions essentielles. Des blocs d'**Application** permettent à l'élève de contextualiser immédiatement les notions les plus importantes.

Ils sont suivis par une double-page présentant, en regard, l'**Essentiel** des notions du cours et des **Tests**, également conçus pour être utilisés en autonomie et entièrement corrigés en détail à la fin du manuel. Un **flashcode** figure à chacune de ces pages (voir ci-après le paragraphe *Accompagnement numérique*).

• Deux **Exercices résolus** sont disponibles dans chaque chapitre, de manière à permettre à l'élève de s'approprier en autonomie les notions du chapitre de manière moins ponctuelle qu'avec les tests. L'un de ces exercices peut être libellé « Bac » et constitue une approche des sujets type bac. Les énoncés des exercices résolus sont suivis de corrigés détaillés et accompagnés de blocs **Aides et méthodes** insistant le plus possible sur l'acquisition des méthodes de résolution.

• Les **Exercices** sont scindés en plusieurs parties :
  – les **Applications** sont des exercices d'application simples et directes du cours, classées par thèmes.
  – les exercices d'**Entraînement** restent des exercices simples, mais regroupant plusieurs notions articulées dans un raisonnement ; ils sont repérés par des compétences relatives au programme.
  – les exercices d'**Approfondissement** ne sont pas forcément des exercices compliqués ou calculatoires, mais peuvent prolonger une notion au-delà des compétences exigibles, dans l'objectif d'une préparation à l'enseignement supérieur.
  – les **Exercices de bac** terminent la section des exercices, avec des énoncés conçus pour la formation spécifique au baccalauréat ; le dernier de chaque chapitre (parfois les deux derniers) demande à l'élève de produire une synthèse à partir des documents proposés à la dernière page du chapitre. De tels exercices répondent aux compétences « Créer et innover ».

• Chaque chapitre est clos par une page comportant deux documents, repérés par les thèmes **Actualités scientifiques et technologiques**, **Science et société** et **Métiers et formations**. Ils peuvent être utilisés par les exercices de synthèse sur la page en regard, ou faire l'objet d'une lecture de l'élève spontanée ou guidée.

## L'objectif du bac

Si cette année de Terminale S est censée préparer à l'enseignement supérieur (avec les exigences d'autonomie déjà évoquées), elle doit contenir également une préparation au baccalauréat.

Le manuel d'enseignement spécifique *Nouveau Microméga* propose, outre les diverses activités et le cours, plusieurs types de travaux spécialement dédiés à la préparation au bac.

• Un **exercice résolu**, quasiment dans chaque chapitre, est conçu comme un exercice de bac, pour être travaillé en autonomie par l'élève.

• Une section d'**exercices de bac** figure dans chaque chapitre. Ces exercices n'utilisent que les compétences du chapitre et, parfois, celles des chapitres précédents.

• Une section d'**exercices de bac** utilisant les notions de **plusieurs chapitres** figure également en fin de manuel. Ils sont classés dans l'ordre chronologique des chapitres.

• Le manuel propose également huit sujets d'**épreuve expérimentale type bac** ayant pour but de préparer l'élève à cette épreuve. L'enseignant peut s'en saisir de différentes manières : il peut les utiliser à l'occasion de bacs blancs, mais aussi s'en servir comme alternative aux activités expérimentales proposées dans le manuel, ou encore comme complément à ces activités, par exemple à la fin d'une partie.

## Fiches-méthodes et rabats de couvertures

Quatorze **fiches-méthodes** sont proposées en fin de manuel. Y renvoyer fréquemment l'élève lui permettra de s'approprier les outils dont les usages récurrents sont expliqués. Elles proposent de nombreuses aides techniques, en mathématiques et en calcul (utilisation de la calculatrice, exploitation graphique, analyse dimensionnelle), en physique expérimentale (utilisation d'un système d'acquisition, réalisation et exploitation d'une vidéo), en chimie expérimentale (verrerie, préparation d'une solution, chimie organique, pH-mètre et conductimètre), mais aussi pour ce qui concerne l'épreuve du baccalauréat et les exercices de rédaction d'une synthèse de documents.

Les **rabats de couverture** contiennent essentiellement des données (tableau périodique, conductivités molaires ioniques, pKa, zones de virage d'indicateurs colorés, déplacements chimiques RMN, données astronomiques, triangle des couleurs complémentaires, constantes), mais aussi des aides-mémoire (grandeurs et unités, formules usuelles, groupes caractéristiques en chimie organique).

## Accompagnement numérique

L'accompagnement numérique est autant pour le manuel de l'élève que pour le livre du professeur. Pour le cédérom du manuel, l'utilisateur trouvera des fiches d'introduction de chaque chapitre, sous forme de problématisation illustrée. Ces fiches permettent d'annoncer l'intérêt du chapitre. Des outils de travail sont fournis, pour chaque chapitre, sous forme d'un simulateur, d'une vidéo et de questionnaires sur les connaissances du chapitre. Enfin, des diapositives de synthèse des connaissances du chapitre sont proposées, pour être projetées et pour en discuter avec la classe.

L'accompagnement numérique du livre du professeur correspond au présent livre. Il peut être pratique pour rechercher de l'information grâce au moteur de recherche, ou de récupérer des schémas.

Pour conclure, une nouveauté : dans chaque chapitre un flash code donne accès, depuis un téléphone mobile, à des QCM pour tester ses connaissances.

Chapitre d'introduction

# Mesures et incertitudes

Ce chapitre liminaire répond à une attente transversale du programme qui consiste à prendre en charge les notions d'incertitude et d'erreur en classe de Terminale S. Nous avons porté notre attention sur la prise de conscience des causes de limitation de la précision (sources d'erreurs), de leurs implications sur la qualité de la mesure (représentation des données) et de leur propagation dans les calculs (formulation du résultat).

## Introduction au chapitre (p. 10)

### Structure du chapitre

La réponse à ces objectifs fait l'objet d'un chapitre dont la structure est identique à celle des autres.

L'entrée en matière se fait par un **test de prérequis** reprenant surtout la notion de chiffres significatifs, dont ce chapitre va approfondir la compréhension.

Puis, **deux activités expérimentales** sont proposées : l'une sur la vitesse de propagation du son, en résonance avec la partie sur les ondes, et l'autre sur la préparation de solutions avec la verrerie usuelle en chimie. Dans chacune d'elles, un regard critique est porté sur les résultats de mesures et leur précision.

Le **cours** propose de donner du sens aux notions liées aux erreurs et aux incertitudes, en reprenant les notions de grandeurs et, à titre de rappel, aux unités associées. La notion de précision est introduite à l'aide de la métaphore du tir sur une cible qui peut être centré plus ou moins précisément, groupé loin du centre ou totalement éparpillé. La relation entre les chiffres significatifs et la précision est centrale dans ce cours.

Ces informations sont synthétisées dans une page intitulée **L'essentiel** et un test de connaissances.

Un **exercice corrigé**, trois **exercices résolus** et quatorze **exercices d'application** concluent le chapitre.

### Choix et limitations du programme

À la demande du programme, la propagation des erreurs dans un calcul se fera toujours à partir d'une formule fournie. Nous nous sommes limités à l'expression de la dérivée logarithmique (sans utiliser ce terme) qui se traduit ainsi : l'incertitude relative sur $c$ (dans $c = \frac{n}{V}$) est $\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta V}{V}$.

Cette approche majore largement l'incertitude relative, ce qui n'est pas gênant car l'objectif du programme est plus de comprendre les principes de base de la métrologie que d'obtenir des estimations précises des incertitudes. Le problème de l'estimation d'une incertitude est soulevé dans les cas les plus usuels.

Sont ainsi distingués, soit les cas simples à discuter comme celui d'une mesure unique ou d'un grand nombre de mesures, soit les cas délicats d'un petit nombre de mesures ou de mesures reportées sur un graphe.

Dans le cas d'une mesure unique, la seule réflexion possible consiste à estimer les causes d'erreurs à partir du matériel utilisé et du soin apporté à son utilisation.

Dans le cas d'un grand nombre de mesures, le traitement n'est pas basé sur ce type d'estimation mais se détermine à l'aide d'une approche statistique. Les cas les plus « simples » concernent les comptages en radioactivité ou l'élimination du bruit de fond en RMN. La règle est celle de l'augmentation du rapport signal sur bruit en racine carrée du nombre de mesures.

Le cas plus fréquent en Terminale S du petit nombre de mesures pose un problème théorique délicat car il n'est pas accessible au traitement statistique du type règle de Student (non abordé en Terminale). Il est simple de faire accepter aux élèves que la valeur moyenne de quelques résultats est une meilleure approximation qu'une valeur unique.

Il est plus difficile, en revanche, de leur faire comprendre que l'incertitude sur cette valeur est la même que celle sur une valeur unique. Le travail pour faire plusieurs mesures ne serait pas récompensé ? La moyenne est plus proche de la valeur de référence, mais il n'est pas possible de dire de combien.

Pour ce qui est des valeurs reportées sur un graphe, il en est de même. La valeur obtenue, par calcul de la pente par exemple, souffre de la même incertitude que celle obtenue avec une valeur unique. Quel est donc l'intérêt du fastidieux travail de report sur le graphe, pourraient demander des élèves ? La réponse tient en plusieurs points :

- l'alignement des valeurs permet de valider le modèle envisagé,
- il permet d'écarter une mesure aberrante,
- il permet de fournir une valeur plus proche de la valeur de référence, même s'il n'est pas possible de quantifier cette amélioration.

L'élimination d'une mesure aberrante pose un problème théorique que nous n'avons pas abordé, celui du motif qui permet cette élimination. En métrologie, une valeur aberrante n'est pas éliminée *a priori* ; au contraire, elle est examinée de près comme l'indicateur d'un possible problème méthodologique qui doit interroger. En TP, la règle de l'élimination sera en vigueur par manque de temps, et parce que la méthodologie de mesure est supposée avoir été discutée et validée en dehors de la classe.

## Les chiffres significatifs

Les chiffres significatifs fournis par l'élève traduisent la qualité de la réflexion dont il a fait preuve lors de son travail. Nous savons que les professeurs y sont attachés et nous avons opté pour une utilisation raisonnée et non automatique, comme dans les classes précédentes. Jusqu'en Première S, le résultat d'un produit ou d'une division est écrit avec le nombre de chiffres significatifs du terme qui en possède le moins. La réflexion sur les incertitudes impose d'aller plus loin. Considérons deux cas d'école.

### *Limite de la signification des chiffres significatifs*

Les valeurs 99,7 et 101 sont toutes deux exprimées avec trois chiffres significatifs. Au regard d'un élève de Première S, elles sont connues avec la même précision. En Terminale S, la convention utilisée indique qu'en l'absence d'information sur la précision, les intervalles de confiance pour ces deux valeurs sont [99,65 ; 99,75] et [100,5 ; 101,5] soit des incertitudes relatives respectivement égales à $5.10^{-4}$ et $5.10^{-3}$. La première valeur (99,7) est donc exprimée avec une incertitude relative dix fois plus petite que la seconde (101). Cette prise de conscience est nouvelle pour les élèves.

### *Résultat d'un calcul*

La règle évoquée précédemment, sur le nombre de chiffres significatifs du résultat d'un produit, montre ses limites dans le cas d'un produit de dix termes, chaque terme étant connu avec une incertitude relative de $\frac{1}{100}$. En Première S, la règle indique que le résultat a la même incertitude $\left(\frac{1}{100}\right)$ alors qu'en Terminale S, l'incertitude sur le résultat, calculée avec la formule de la dérivée logarithmique est de $10 \times \frac{1}{100}$ soit $\frac{1}{10}$. Il faut donc un chiffre significatif de moins. Cette situation extrême est détaillée sur un cas concret ci-dessous.

### *Calcul d'une incertitude*

Le calcul d'incertitude ne respecte pas les habitudes sur les chiffres significatifs. En effet, pour savoir comment exprimer le résultat d'un calcul de la concentration $c$ quand $n = 0{,}043\ 6 \pm 4.10^{-4}$ mol est introduite dans $V = 350 \pm 3$ mL, il faut dans un premier temps trouver la valeur de $c$ et l'exprimer *avec un excès* de chiffres significatifs :

$$c = \frac{0{,}0436}{0{,}350} = 2{,}776.10^{-2}\ \text{mol.L}^{-1}$$

Dans un second temps, il faut calculer les incertitudes relative et absolue sur $c$ en l'exprimant *avec deux* chiffres significatifs, soit :

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta V}{V} = \frac{0{,}0004}{0{,}0436} + \frac{3}{350} = 0{,}018 \text{ et } \Delta c = 0{,}027\ 76 \times 0{,}018 = 0{,}000\ 50 = 5{,}0.10^{-4}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

Une fois ce travail effectué, le résultat et son incertitude absolue sont exprimés en accordant le nombre de chiffres significatifs du résultat à l'incertitude absolue, soit $c = 2{,}8.10^{-2} \pm 5.10^{-4}$ mol.L$^{-1}$.

Deux chiffres significatifs sont suffisants pour $c$ (et non pas trois comme la règle des chiffres significatifs l'aurait prévu) vu l'incertitude absolue, et un seul est suffisant pour exprimer l'incertitude.

Le travail est donc plus long que l'application directe de la règle des chiffres significatifs. Il nous semble important de le faire de temps en temps avec les élèves.

### *La fonction logarithme*

En Terminale S, plusieurs fonctions mathématiques, dont la fonction logarithme, interviennent dans les calculs. Le problème du nombre de chiffres significatifs à utiliser se pose. Le cas de la fonction logarithme sera présenté dans le chapitre 14 avec l'introduction de la notion de pH.

Le nombre de chiffres significatifs après la virgule sur la valeur du pH doit être égal au nombre total de chiffres significatifs sur la valeur de la concentration en ions $H_3O^+$. Par exemple, si le pH vaut 4,55, la calculatrice affiche $10^{-4,55} = 2{,}818\ 382\ 931.10^{-5}$ mais il ne faut retenir que deux chiffres : $[H_3O^+] = 2{,}8.\ 10^{-5}$ mol.L$^{-1}$ car le pH ne possède que deux chiffres significatifs après la virgule (les deux 5).

La raison de cette règle tient au fait que, dans pH = 4,55, les trois chiffres 4, 5 et 5 ne jouent pas le même rôle. Au sens mathématique, 4 est la caractéristique du logarithme et 55 est sa mantisse. Le rôle de 4 est de prendre en compte la puissance de 10 de la concentration et n'exprime donc pas de précision. Seul « 55 » contient l'information sur cette précision, d'où la règle énoncée que l'élève doit savoir appliquer.

## Activités

## 1 Détermination de la vitesse du son dans l'air (p. 12)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale introduit la notion d'incertitude dans des mesures classiques de célérité du son dans l'air à l'aide de claps sonores. Elle peut être ainsi utilisée en remplacement ou en complément des activités expérimentales proposées dans les chapitres 1 et 2. L'activité est composée de deux parties : la première conduit, à partir d'une mesure unique de distance et de retard, à la valeur de la célérité assortie de son incertitude ; la deuxième utilise une série de mesures de cette sorte et une construction graphique pour améliorer la valeur obtenue.

### *Correspondance avec le programme*

- Identifier les différentes sources d'erreur (de limites à la précision) lors d'une mesure.
- Évaluer l'incertitude d'une mesure unique obtenue à l'aide d'un instrument de mesure.
- Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.
- Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité).
- Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde.
- Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la célérité d'une onde.

### *Liste du matériel*

- Deux microphones, si possible identiques.
- Un système d'acquisition informatisé.
- Un mètre ruban.
- Des cordons.

### *Corrigé*

**a.** L'incertitude absolue sur la mesure de $\tau$ dépend de la période d'échantillonnage, qui donne le pas en abscisse sur le graphe, et de la clarté du repérage du début du signal. Le logiciel peut fournir à l'élève un grand nombre de chiffres pour $\tau$ (par exemple $\tau = 1{,}186$ ms) alors que d'autres valeurs seraient tout aussi acceptables. Cette réflexion sur la pertinence des chiffres exprimés pour $\tau$ conduit donc à évaluer l'incertitude absolue associée (par exemple $\Delta\tau = 0{,}02$ ms). L'incertitude relative s'en déduit (ici $\frac{\Delta\tau}{\tau} = 2.10^{-2}$).

**b.** Les erreurs sur la mesure de $d$ sont liées :

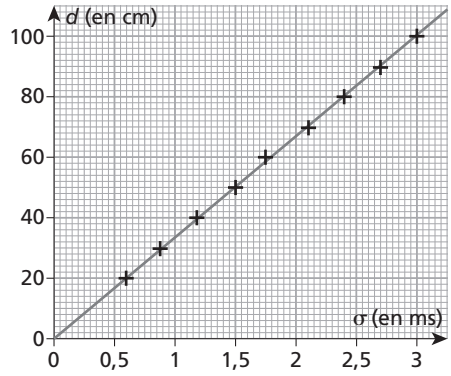
- au positionnement des détecteurs par rapport au clap, qui n'est pas créé en un point repéré facilement, mais en une zone étendue et mal délimitée ;
- au repérage des points d'entrée des microphones ;
- à la lecture sur le mètre ruban.

Du fait de ces erreurs, l'incertitude sur la mesure de $d$ ne peut pas être inférieure à $\Delta d = 1$ cm. Pour une valeur $d = 40$ cm, cela donne l'incertitude relative $\frac{\Delta d}{d} = 3.10^{-2}$.

**c.** L'incertitude relative sur $v$ est donc $\frac{\Delta v}{v} = 5.10^{-2}$. Pour la diminuer, il est possible de réduire l'incertitude sur $d$ en utilisant un instrument fin et bien localisé pour créer le clap et de placer celui-ci dans l'alignement des deux microphones. Ainsi, cela éviterait de mesurer deux distances (la distance entre la source du clap et chacun des microphones) et d'en faire la différence, ce qui accroît l'incertitude. Il est possible de diviser l'incertitude absolue sur $d$ par deux avec cette méthode.

**d.** La valeur obtenue pour la célérité est ici : $v = \frac{d}{\tau} = 337{,}3$ m.s$^{-1}$. L'incertitude absolue est $\Delta v = 5.10^{-2} \times 337{,}3 = 2.10^{1}$ m.s$^{-1}$. La valeur de la célérité obtenue est ainsi $v = 3{,}4.10^{2} \pm 2.10^{1}$ m.s$^{-1}$. La valeur attendue est dans l'intervalle de confiance.

**e.** La droite obtenue a une équation de la forme $d = k\tau$. Or, $d$ et $\tau$ sont liés par la relation $d = v\tau$. Le coefficient directeur $k$ est donc bien la célérité du son dans l'air.




**f.** L'incertitude absolue associée à une mesure unique est $\Delta v = 2.10^{1}$ m.s$^{-1}$. Pour une série de huit mesures, l'incertitude absolue est donc :

$$\Delta v_8 = \frac{\Delta v}{\sqrt{8}} = 7 \text{ m.s}^{-1}.$$

Le coefficient directeur de la droite est :

$$k = \frac{117.10^{-2}}{3{,}50.10^{-3}} = 334 \text{ m.s}^{-1}.$$

Le résultat de la mesure est donc $v = 334 \pm 7$ m.s$^{-1}$.

***Commentaires***

• Pour les réglages, nous proposons une durée totale voisine d'une demi-seconde et le plus de points de mesure que permet le système d'acquisition. Il est possible de déclencher l'acquisition sur le signal reçu par le premier microphone mais cela implique que les microphones n'aient pas de tension de décalage. S'ils en ont une, fluctuante ou fixe, il est possible de faire l'acquisition sans déclenchement en demandant à l'élève de faire plusieurs claps, de manière à ce qu'il y en ait au moins un d'enregistré.

• Il a été choisi de ne pas demander d'effectuer le clap dans l'alignement des deux microphones, sachant que cela reste évidemment une possibilité. Les élèves sont peu soigneux sur la mesure de $d$ (moins que sur la mesure de $\tau$) et le protocole proposé (déterminer $d$ comme la différence de distances à parcourir par le son entre la source et chacun des microphones) les conduit à une réflexion sur cette mesure.

• L'indication finale autorisant à diviser l'incertitude par $\sqrt{n}$ est une approximation de la règle usuelle et n'est valable qu'à partir d'un nombre de mesures suffisant (huit est à peine suffisant).

## 2 Préparation de solutions et incertitude (p. 13)

***Objectif***

Le but est de comprendre comment utiliser la verrerie de base pour préparer des solutions avec une précision adaptée aux nécessités des expériences réalisées. L'activité expérimentale est organisée en deux courtes parties indépendantes. D'abord, les élèves sont guidés pour déterminer le volume d'eau contenu dans un bécher, puis celui contenu dans une éprouvette et une fiole jaugée remplie jusqu'à un trait dont le volume est indiqué par le constructeur. La détermination de ces volumes par des pesées, dont l'incertitude est faible comparée aux indications volumiques, permet de prendre conscience de la précision des trois types de verrerie. Cette première partie prend de l'intérêt si les différents binômes mettent leurs résultats en commun. Ensuite, il est demandé de préparer deux solutions par dilution, avec pipette et fiole jaugée, et d'estimer la précision avec laquelle ces concentrations sont connues. À l'aube de cette année de préparation à l'ECE, cette activité permet de surcroît de s'assurer que les élèves utilisent correctement la verrerie de laboratoire.

### *Correspondance avec le programme*

• Identifier les différentes sources d'erreur (de limites à la précision) lors d'une mesure.

• Évaluer et comparer les incertitudes associées à chaque source d'erreur.

• Évaluer l'incertitude d'une mesure unique obtenue à l'aide d'un instrument de mesure.

• Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.

• Exprimer le résultat d'une opération de mesure par une valeur issue éventuellement d'une moyenne et une incertitude de mesure associée à un niveau de confiance.

• Commenter le résultat d'une opération de mesure en le comparant à une valeur de référence.

### *Liste du matériel et des produits*

**Pour la partie 1 :**

• Un bécher avec une graduation à 100 mL.
• Une éprouvette graduée de 100 mL.
• Une fiole jaugée de 100 mL.
• Un entonnoir (optionnel).
• Un accès à une balance au centigramme.
• De l'eau (distillée ou pas) dans une pissette.

**Pour la partie 2 :**

• Une coupelle de pesée.
• Une spatule.
• Deux fioles jaugées de 100 mL et leur bouchon.
• Un bécher de 100 mL (pour le pipetage).
• Une pipette jaugée de 5 mL.
• Une poire d'aspiration.
• Du sulfate de cuivre pentahydraté.
• De l'eau.

### *Corrigé*

**1.a.** Les résultats ci-dessous ont été obtenus avec de l'eau distillée (en utilisant l'eau d'une mesure pour faire la suivante et en compensant les pertes avec une pissette d'eau).

La température de l'eau (20,5 °C, mesurée avec un thermomètre à alcool) a été prise en compte pour la masse volumique, $\rho_{20,5} = 0{,}998\ 06\ \text{g.cm}^{-3}$.

| Béchers | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | écart-type | moyenne écart relatif |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tare | 65,10 | 65,88 | 66,16 | 65,50 | 66,90 | | |
| Masse avec eau | 163,14 | 164,76 | 165,22 | 164,17 | 163,27 | | |
| Masse de l'eau | 98,04 | 98,88 | 99,06 | 98,67 | 96,37 | | |
| Volume d'eau | 98,23 | 99,07 | 99,25 | 98,86 | 96,56 | 1,095 | |
| Écart relatif | 0,017 7 | 0,009 3 | 0,007 5 | 0,011 4 | 0,034 4 | 0,011 0 | 0,016 1 |

| Fioles jaugées | F1 | F2 | F3 | F4 | F5 | écart-type | moyenne écart relatif |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tare | 62,00 | 62,24 | 60,62 | 62,32 | 59,84 | | |
| Masse avec eau | 161,72 | 161,85 | 160,42 | 162,12 | 159,49 | | |
| Masse de l'eau | 99,72 | 99,61 | 99,80 | 99,80 | 99,65 | | |
| Volume d'eau | 99,91 | 99,8 | 99,99 | 99,99 | 99,84 | 0,086 | |
| Écart relatif | 0,000 9 | 0,002 0 | 0,000 1 | 0,000 1 | 0,001 6 | 0,000 9 | 0,000 9 |

| Éprouvettes | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | écart-type | moyenne écart relatif |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tare | 121,09 | 116,12 | 132,77 | 126,41 | 133,61 | | |
| Masse avec eau | 220,95 | 215,91 | 232,58 | 225,82 | 233,48 | | |
| Masse de l'eau | 99,86 | 99,79 | 99,81 | 99,41 | 99,87 | | |
| Volume d'eau | 100,05 | 99,98 | 100,00 | 99,60 | 100,06 | 0,192 | |
| Écart relatif | 0,000 5 | 0,000 2 | 0,000 0 | 0,004 0 | 0,000 6 | 0,001 7 | 0,001 1 |

**b.** La moyenne des écarts relatifs est 0,001 1 avec une éprouvette de 100 mL, 0,000 9 avec une fiole jaugée de 100 mL et 0,016 1 avec le bécher.

Sur 5 mesures indépendantes, avec de la verrerie différente, les écarts relatifs permettent de retrouver un résultat que les élèves doivent connaître : la fiole jaugée est un outil de détermination de volume plus précis que l'éprouvette, et les graduations du bécher ne sont qu'indicatives.

**2.**

**Protocole de la dissolution**

► À partir de sulfate de cuivre hydraté de masse molaire 159,609 ± 0,009 g.mol$^{-1}$ (valeur Wikipédia), valeur qui peut aussi être calculée à partir des masses molaires données dans la classification périodique du livre ($M$ = 159,6 g.mol$^{-1}$), la masse $m$ qui doit être pesée est :

$$m = nM = cVM$$

$m = 0{,}1 \times 0{,}1 \times 159{,}6 = 1{,}596$ g (l'écriture avec le bon nombre de chiffres significatifs est discutée ci-après).

► Cette masse est pesée dans une coupelle, transférée ainsi que les eaux de rinçage de la coupelle dans la fiole jaugée.

► La fiole jaugée est remplie à moitié d'eau et agitée pour dissoudre le sulfate de cuivre. De l'eau est alors ajoutée jusqu'au trait de jauge et l'ensemble est homogénéisé par renversement. La fiole est étiquetée, c'est la solution $S_1$.

**Protocole de la dilution**

► Pour diluer vingt fois la solution $S_1$, il faut une pipette jaugée de 5 mL et une fiole jaugée de 100 mL.

► La dilution au 20$^{e}$ se fait en mettant une vingtaine de millilitres de la solution mère dans un bécher propre, en en pipetant 5 mL avec une pipette jaugée, en introduisant ce prélèvement dans une fiole jaugée de 100 mL et en complétant au trait de jauge comme à la question précédente.

**c.** L'incertitude absolue $\Delta c_1$ est déterminée à partir de l'incertitude relative. Le calcul ci-dessous est effectué pour une balance qui pèse à 0,01 g près (valeurs du tableau ci-dessus). Chaque masse est connue à 0,005 g près, valeur qu'il faut doubler puisqu'il y a la pesée de la tare puis la pesée {tare + eau}.

$$\frac{\Delta c_1}{c_1} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta V}{V}$$

$$\frac{\Delta c_1}{c_1} = \frac{0{,}01}{1{,}6} + \frac{0{,}1}{159} + \frac{0{,}10}{100} = 0{,}0078$$

D'où $\Delta c_1 = 0{,}007\,8 \times 0{,}1 = 0{,}8.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$. Dans ce calcul, l'erreur sur la masse molaire a été prise égale à 0,1 g.mol$^{-1}$ en supposant que l'élève a utilisé les masses atomiques de son manuel. Si la valeur Wikipedia est utilisée, alors il faut remplacer $\frac{0{,}1}{159}$ par $\frac{0{,}009}{159}$, ce qui améliore la précision dans le calcul d'incertitude global.

Par ailleurs, la masse molaire doit être écrite 159,6 dans un cas et 159,61 dans l'autre.

**d.** $\frac{\Delta c_2}{c_2} = \frac{\Delta c_1}{c_1} + \frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{\Delta V_2}{V_2}$

Les incertitudes sont prises sur la verrerie utilisée, ou à défaut sur la **figure 2** p. 13 soit, à partir de la photo : $\Delta V_1 = 0{,}015$ mL et $\Delta V_2 = 0{,}10$ mL.

Donc : $\frac{\Delta c_2}{c_2} = \frac{8.10^{-4}}{0{,}1} + \frac{0{,}015}{5} + \frac{0{,}1}{100}$

$$= 0{,}012 \times \frac{0{,}1}{50} = 0{,}0012 \text{ mol.L}^{-1}$$

**e.** Si cette seconde solution avait été préparée comme la première, il aurait fallu peser :

$$m' = \frac{m}{20} = \frac{1{,}596}{20} = 0{,}0798 \text{g},$$

ce qui n'est pas raisonnable avec une balance au centigramme, mais poursuivons le raisonnement pour montrer que le calcul le confirme effectivement.

Par pesée, l'incertitude $\Delta c_2$ aurait été donnée par la relation déjà utilisée :

$$\frac{\Delta c_2}{c_2} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta V}{V}$$

$$\frac{\Delta c_2}{c_2} = \frac{0{,}01}{0{,}08} + \frac{0{,}1}{159} + \frac{0{,}10}{100} = 0{,}13$$

(soit 13 % d'incertitude relative !).

Avec une balance au décigramme, l'incertitude relative aurait été supérieure à 100 %.

**f.** Les incertitudes sur chaque mode opératoire montrent que la préparation d'une solution diluée en deux étapes (préparation d'une solution concentrée suivie d'une dilution) est de loin préférable à une préparation en une étape, surtout si la balance n'est pas d'une grande précision.

***Commentaires***

**Pour la partie 1 :**

• Il est intéressant de remarquer l'importance de plusieurs déterminations pour conclure. En effet, si la seule mesure effectuée avait été la mesure 3 (pour chaque verrerie), la conclusion n'aurait pas été la même.

• Considérer que la masse volumique de l'eau est de 1,00 $g.cm^{-1}$, comme c'est souvent admis, constituerait une erreur systématique qui conduirait toujours à ce que le bécher soit l'instrument le moins précis, mais qui ne permettrait pas de différentier la précision de la fiole de celle de l'éprouvette. Avec la métaphore du tir à la cible utilisée dans le cours, les mesures correspondant à la fiole jaugée correspondraient au tir groupé de la **figure 3 c.** (p. 15), peu juste et bien fidèle.

• La valeur précise de la masse volumique de l'eau en fonction de la température se trouve dans le Handbook ou sur le web (voir lien utile **1**).
La température de l'eau utilisée pour nos mesures était de 20,5 °C ; la valeur de la densité a été prise comme la moyenne des valeurs à 20 et à 21 °C.

• Il est rare, en sciences physiques, de proposer aux élèves un TP pour lequel les élèves qui ne trouvent pas la valeur attendue peuvent s'en rendre compte par *eux-mêmes* et revenir sur leur travail afin de l'améliorer. C'est une situation didactiquement comparable au puzzle de G. Brousseau (voir lien utile **2**).

**Pour la partie 2 :**

• La précision d'une pipette jaugée peut être estimée en fonction de l'ajustement de la hauteur du liquide à chaque trait de jauge. Si le diamètre interne de la pipette est $D = 0{,}5$ cm et que le trait de jauge a une épaisseur de $h = 0{,}1$ cm, le volume correspondant à la hauteur du trait de jauge (multiplié par deux car il y a deux traits de jauge) peut être estimé comme la précision sur la pipette, soit :

$$\Delta V = 2 \times \frac{\Delta D^2}{4h}$$

$$\Delta V = 2 \times \frac{3{,}14 \times 0{,}5^2}{4 \times 0{,}1} = 0{,}02 \text{ mL}$$

(valeur peu différente de celle relevée sur la verrerie).
Si la pipette est utilisée à une autre température que celle prévue par le constructeur (20 °C), son volume n'est plus exact. Son expansion quadratique est généralement négligée. En revanche, la dilatation de la solution conduit à une erreur significative (voir lien utile **3**).

## Exercices

### 1 Histoire de grandeurs : Vrai ou faux ?

**a.** Vrai.

**b.** Vrai.

**c.** Faux : le voltmètre est un appareil de mesure, non une grandeur.

**d.** Faux : la quantité de matière s'exprime en moles.

**e.** Faux : la masse molaire ne se « pèse » pas.

*Remarque* : Une masse molaire moléculaire se calcule à partir des masses molaires atomiques, mais elle se mesure aussi, par exemple par osmométrie. Les masses molaires atomiques se déterminent de façon indirecte, soit par comparaison à une masse de référence ($^{12}C$) lors de l'étude de réactions chimiques, soit à l'aide d'un spectrographe de masse.

### 2 Grandeur et unité

Les grandeurs mentionnées dans chaque phrase et leurs unités respectives sont :

**a.** absorbance, sans unité ; longueur d'onde, en mètres.

**b.** intensité électrique, en ampères ; tension, en volts ; résistance, en ohms.

**c.** énergie potentielle, énergie cinétique, énergie mécanique, en joules. Le mot *masse* désigne ici un objet et non une grandeur.

### 3 Valeur estimée

**a.** 0,027 est la valeur estimée, la valeur de référence est 0,1 et l'intervalle de confiance est [0,025 ; 0,029].

**b.** 589,592 4 est une valeur de référence, étant donnée son écriture, l'intervalle de confiance est [589,592 35 ; 589,592 45].

**c.** $6{,}022\,141\,79.10^{23}$ est une valeur de référence et l'intervalle de confiance est :
$[6{,}022\,141\,785.10^{-23} ; 6{,}022\,141\,795.10^{-23}]$.

### 4 Écriture d'une valeur

**a.** $3{,}4 \pm 0{,}2$

**b.** $9{,}27 \pm 0{,}03$

**c.** $5{,}930 \pm 0{,}005$

**d.** $50 \pm 1$

### 5 Intervalles de confiance

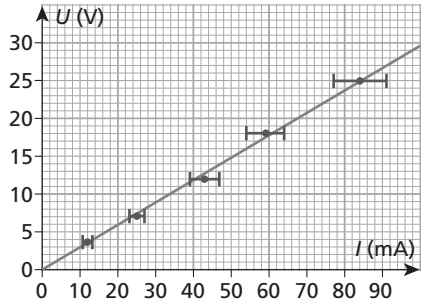
**a.** [3,6 m ; 4,2 m]

**b.** [0,007 g ; 0,017 g]

**c.** [8,145 mol ; 8,155 mol]

## 6 Barres d'erreur et loi d'Ohm

**a.**




Les barres d'erreur sur $U$ sont trop petites pour être visibles sur le graphe.

**b.** Une relation linéaire entre $U$ et $I$ peut être envisagée car il est possible de tracer une droite passant par (0,0) et par l'ensemble des zones définies par les points et leurs barres d'erreur.

## 7 Barres d'erreur et loi de Beer-Lambert

**a.**

| $c$ (mol.L$^{-1}$) | $A$ (sans unité) |
|---|---|
| 0,008 | 0,20 ± 0,06 |
| 0,016 | 0,44 ± 0,06 |
| 0,028 | 0,46 ± 0,06 |
| 0,039 | 1,00 ± 0,06 |

**b.** Pour l'absorbance, la barre d'erreur indique que l'incertitude absolue est $\Delta A = 0{,}06$.

Pour la concentration, l'absence de barre d'erreur peut être comprise comme une erreur inférieure à ce qu'il est possible de représenter sur un tel graphe (0,003 mol.L$^{-1}$).

**c.** Les points s'alignent, traduisant la loi de proportionnalité de Beer-Lambert $A = kc$.

## 8 Incertitudes absolue et relative

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

## 9 Incertitudes absolue et relative

**a.** 0,14 mA ; $0{,}3.10^{-2}$.
**b.** 10 kV ; $3.10^{-3}$.
**c.** 7 MHz ; 0,14.

## 10 Incertitude sur un volume

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

## 11 Incertitude avec un appareil de mesure

**a.** L'incertitude absolue est $257 \times 5.10^{-3} + 1 = 2{,}3$ mA.

L'incertitude relative est $\frac{2{,}3}{257} = 9.10^{-3}$.

Cette intensité s'écrit $I = 257 \pm 2{,}3$ mA.

**b.** Pour la longueur d'onde, l'incertitude absolue est 1 nm et l'incertitude relative $\frac{1}{545} = 1{,}8.10^{-3}$.

La longueur d'onde s'écrit $\lambda = 545 \pm 1$ nm.

Pour l'absorbance, l'incertitude relative est 0,3 % (valeur donnée) et l'incertitude absolue est : $3.10^{-3} \times 0{,}358 = 1.10^{-3}$ (sans unité).

## 12 Plusieurs mesures d'une boule

**a.** La valeur retenue aurait été 6,8 cm avec une incertitude qui est plus due à la méthode (une règle graduée n'est pas appropriée pour mesurer un diamètre de sphère) qu'à l'instrument lui-même, dont la précision est 1 mm. Il faut donc prendre une erreur de l'ordre du centimètre.

**b.** La première mesure est probablement aberrante. Elle est éliminée pour le traitement statistique de l'ensemble des mesures.

**c.** Il faut retenir la valeur moyenne des 5 dernières mesures soit 7,52 cm (le nombre de chiffres significatifs est déterminé ci-après).

**d.** L'incertitude absolue est $\frac{5}{\sqrt{5}} = 2{,}2$ mm.

L'incertitude relative est $\frac{2{,}2}{75{,}2} = 0{,}03$ (3 %).

**e.** Le résultat ne doit pas afficher de chiffres significatifs au-delà du millimètre vu que l'incertitude absolue est de 2 mm.

Le diamètre de la boule est donc 7,5 ± 2 mm.

## 13 Régression linéaire

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

## 14 Identifier des sources d'erreur

**a.** L'oscilloscope doit être capable de mesurer l'intervalle de temps que met le son pour parcourir la distance $d = 1$ m à la vitesse $v = 340$ m.s$^{-1}$, soit $\Delta t = \frac{d}{v} = \frac{1}{340} = 3.10^{-3}$ s.

**b.** Les sources d'erreurs possibles sont la distance entre les micros et la lecture du temps sur l'écran de l'oscilloscope.

**c.** Un mètre est parcouru par la lumière dans l'air en $\Delta t' = \frac{d}{v} = \frac{1}{3.10^8} = 3.10^{-9}$ s.

**d.** Il faut s'assurer que l'oscilloscope peut mesurer une nanoseconde (ce qui n'est pas le cas).

## 15 Comparaison d'incertitudes

**a.** $\tau = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2\times 1}{10}} = 0{,}4$ s

**b.** Les autres sources d'erreurs sont la lecture sur le chronomètre et la mesure de la hauteur.

**c.** L'incertitude sur la hauteur est estimée à 1 mm, au pire à 5 mm. L'incertitude relative est donc $10^{-3}$, soit 0,1 %, ou au pire 0,5 %.

**d.** L'incertitude absolue sur la durée est 0,3 s (0,1 s pour chaque action sur le chronomètre et 0,1 s due à l'instrument).

L'incertitude relative est $\frac{0{,}3}{0{,}5} = 0{,}6$ soit 60 %.

**e.** Le plus gros facteur d'erreur est donc la mesure de la durée (60 %).

**f.** Cela ne sert à rien d'avoir un système plus sophistiqué pour mesurer la hauteur, il vaut mieux sophistiquer la mesure de la durée.

*Remarque*

En ajoutant les incertitudes (de 0,1 s) sur chaque déclanchement du chronomètre, une énorme majoration de l'erreur est en fait prise en compte. En effet, si l'observateur appuie avec 0,1 s de retard dû à son réflexe à la mise en marche du chronomètre, il a toutes les chances d'avoir le même retard à son arrêt et ces deux retards réflexes vont se compenser. En termes statistiques, ces erreurs ne sont pas indépendantes. Le principe des majorations maximales est le seul qui soit enseignable au niveau de la Terminale S.

## 16 Incertitude sur une énergie cinétique

**a.** La masse $m$ peut s'écrire $\frac{1\,100 + 1\,200}{2} = 1\,150$ kg

et l'incertitude absolue est $\frac{1\,200 - 1\,100}{2} = 50$ kg.

La masse s'écrit $m' = 1\,150 \pm 50$ kg.

**b.** L'incertitude absolue sur la vitesse est :

$0{,}02 \times 87 = 1{,}7$ km.h$^{-1}$ soit $\frac{1{,}7}{3{,}6} = 0{,}47$ m.s$^{-1}$.

Avec les unités SI, la vitesse est donc :

$$v = \frac{87}{3{,}6} = 24{,}2 \pm 0{,}5 \text{ m.s}^{-1}.$$

**c.** L'énergie cinétique est $E_c = \frac{1}{2}mv^2$

soit $E_c = 0{,}5 \times 1\,150 \times 24{,}2^2 = 3{,}367.10^5$ J

avec un nombre de chiffres significatifs à déterminer après le calcul d'incertitude.

**d.** L'incertitude relative sur $E_c$ est $\frac{\Delta E_c}{E_c} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{2\Delta v}{v}$

$$\frac{\Delta E_c}{E_c} = \frac{50}{1\,150} + \frac{2\times 0{,}47}{24{,}2} = 0{,}082.$$

**e.** L'incertitude absolue sur l'énergie est :

$$\Delta E_c = 0{,}082 \times 3{,}367.10^5 = 2{,}8.10^4 \text{ J}.$$

L'énergie s'écrit : $E_c = 3{,}4.10^5 \pm 3.10^4$ J.

## 17 Fiabilité d'une mesure

Pour la concentration $c$ de l'acide et de la base, un volume $V$ contient $cV$ moles de soluté.

L'énergie impliquée est $Q = cVQ$ (où $Q$ est l'énergie pour une mole : 56 kJ).

En notant $\rho$ la masse volumique des solutions, cette énergie peut aussi s'exprimer ainsi :

$Q = \rho V \times 1\,000 \times C(\theta_f - \theta_i)$ (1 000 parce que $V$ est en L et $C$ en g).

De ces deux relations de $Q$, il vient :

$$c = \rho C \frac{\Delta\theta}{Q} = 1 \times 4{,}1 \times 1\,000 \times \frac{0{,}5}{56.10^3} = 0{,}04 \text{ mol.L}^{-1}$$

Il faut donc prendre la concentration c = 0,1 mol.L$^{-1}$.

*Remarque*

À la différence des précédents exercices, la démarche pour aboutir au résultat n'est pas fournie.

Cela en fait un exercice plus difficile pour les élèves, mais l'esprit du baccalauréat le requiert, surtout pour l'enseignement de spécialité.

## LIENS UTILES

**1** http://www.econologie.com/masse-volumique-de-l-eau-et-temperature-articles-4032.html (consulté le 14 avril 2012)

**2** http://www-irem.ujf-grenoble.fr/revues/revue_x/fic/21/21x6.pdf

**3** http://ead.univ-angers.fr/~capespc/physique/generalites/mesureserreursincertitudes_moreau2.pdf

Chapitre 1

# Ondes et particules

## Introduction au chapitre (p. 30)

Ce chapitre est le premier chapitre de la partie *Observer*. Il s'intéresse aux ondes et aux particules comme supports d'information. Les ondes électromagnétiques sont abordées en étudiant les sources et les interactions avec l'atmosphère ainsi que les conséquences en termes de positionnement sur les capteurs utilisés pour leur détection. Cette étude permet l'introduction de la notion d'onde progressive, qu'elle soit électromagnétique ou mécanique. Quelques caractéristiques de ces ondes sont ainsi définies (célérité, retard, propriétés).

Le choix a été fait d'introduire dans ce chapitre les caractéristiques d'une onde progressive afin de ne pas se limiter à une simple description des phénomènes. Le niveau d'intensité sonore n'est pas étudié ici mais au chapitre 2.

La compétence « Extraire et exploiter des informations », assez nouvelle en Terminale S et très présente sur ce chapitre, est traitée dans les activités 1, 2 et 3. Elle est reprise dans l'exercice résolu A, les exercices 11, 12 et 19.

L'étude qualitative et quantitative de la propagation d'une onde a été regroupée avec l'utilisation d'un dispositif de détection dans l'activité expérimentale 4.

Les phénomènes étudiés dans ces diverses activités ont été choisis dans l'actualité récente démontrant ainsi tout l'intérêt d'un tel questionnement.

## Activités

### 1 Des capteurs pour observer l'Univers (p. 32)

#### *Objectif*

Cette activité fait écho à l'introduction du programme pour *Observer* :

*[…]Des sources « froides » (rayonnement cosmologique, nuages interstellaires, corps solides…) aux plus « chaudes » (étoiles et sources associées), en passant par les sources composites comme les galaxies,*

*l'Univers est empli d'émetteurs électromagnétiques sur tout le spectre, qui interagissent avec l'atmosphère terrestre. Cette interaction, qui dépend du domaine spectral considéré, conditionne la nature de l'instrument d'observation, son support technologique et son altitude (du sol à l'extérieur de l'atmosphère).[…]*

La compétence « Extraire et exploiter des informations » (EEI) est mise en œuvre ici en s'appuyant sur des documents et photos permettant de répondre aux questions tout en s'aidant des connaissances de cours.

#### *Correspondance avec le programme*

- Extraire et exploiter des informations sur l'absorption des rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation sur des sources de rayonnements de l'Univers.
- Extraire et exploiter des informations des sources d'ondes et de particules et leur utilisation.

#### *Corrigé*

**a.** Le télescope terrestre ne peut étudier que les rayonnements parvenant sur Terre donc non absorbés en haute ou basse atmosphère.

C'est le cas, d'après la **figure 1** du manuel de l'élève, des ondes radio et des ondes du spectre visible.

La **figure 3** indique que ces rayonnements ont pour sources possibles la Voie lactée ainsi que les étoiles et le Soleil.

**b.** La **figure 1** indique que les rayonnements infrarouges ne pénètrent pas les 20 ou 30 derniers kilomètres de l'atmosphère.

La **figure 4** nous montre que le ballon sonde peut être un dispositif adapté à cette étude.

Le rayonnement émis par le plasma sont des rayons X **(Fig. 3)** qui ne pénètrent pas les 100 derniers kilomètres de l'atmosphère **(Fig. 1)** donc un satellite comme celui portant le télescope spatial Hubble **(Fig. 2)** peut convenir pour cette étude.

**c.** Les trous noirs émettent des rayonnements $\gamma$ qui d'après la **figure 1**, pénètrent environ jusqu'à 50 km du sol donc peuvent être étudiés par un ballon sonde ; le télescope spatial n'est donc pas indispensable.

**d.** La communication entre les télescopes spatiaux et la Terre ne peut donc pas se faire en très grandes ondes mais les ondes radio sont utilisables **(Fig. 1)**

### *Commentaires*

• Il est important d'inciter les élèves à s'appuyer sur les documents fournis et à y faire référence lors de la rédaction de leur réponse. Il est aussi nécessaire de mettre en lien les documents, certaines réponses s'appuyant sur plusieurs figures.

• Dans la question **a**, le professeur peut insister sur le fait que, si un grand nombre d'émetteurs célestes peut être étudié avec un capteur terrestre, seule une partie des informations provenant de ces émetteurs sont accessibles avec un tel capteur.

• La question **b.** est typique d'une exploitation maximale des documents et de la nécessité de faire explicitement référence à ces documents dans la rédaction de la réponse.

• Concernant la question **c**, si le concept de trou noir a été développé au début du XX$^{e}$ siècle avec la théorie de la relativité d'Einstein, ce n'est qu'en 1971 que les premières observations exploitables ont eu lieu grâce au satellite Uhuru car les rayons $\gamma$ émis par un objet contenant un trou noir ne peuvent être observés qu'en dehors de l'atmosphère.

• Les bandes de fréquences utilisées dans les communications entre satellites et la Terre sont entre 10 et 30 GHz. L'ionosphère empêche toute fréquence inférieure à 30 MHz de franchir l'atmosphère.

• La **figure 1** est une vision simpliste de la pénétration des ondes. Il est évident que celles-ci ne sont pas arrêtées totalement à une altitude donnée mais que leur absorption est considérée comme tellement importante que l'on considère que la part pénétrante est devenue négligeable. L'exercice 12 p. 48 du manuel de l'élève est un complément à cette activité. Le rayonnement en provenance d'objets hors atmosphère doit traverser une certaine épaisseur d'atmosphère.

Les particules et les gaz dans l'atmosphère peuvent dévier ou bloquer le rayonnement incident. Ces effets sont causés par les mécanismes de diffusion et d'absorption. La diffusion se produit lors de l'interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère. Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale. Le niveau de diffusion dépend de plusieurs facteurs comme la longueur d'onde, la densité de particules et de molécules, et l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit franchir. Un autre phénomène entre en jeu lorsque le rayonnement électromagnétique interagit avec l'atmosphère : c'est l'absorption. L'absorption survient lorsque les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone et vapeur d'eau) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde.

## 2 Éruption solaire sous haute surveillance (p. 33)

### *Objectif*

Le phénomène étudié ici est couramment mis en une des sites d'informations à cause de son côté spectaculaire mais aussi des conséquences économiques et stratégiques qu'il peut avoir. Cette activité est l'occasion d'aborder le capteur Geiger Müller dont une modélisation simplifiée est donnée.

### *Correspondance avec le programme*

Extraire et exploiter des informations sur :
– des sources d'ondes et de particules et leur utilisation.
– des dispositifs de détection.

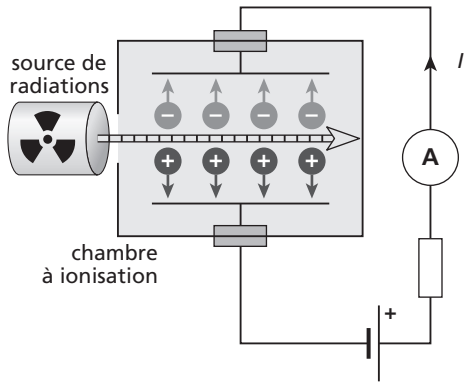
### *Corrigé*

**a.** La photo de la **figure 5** du manuel de l'élève ne nous informe que sur le rayonnement visible donc ne permet pas de connaître la composition du vent solaire. Nous ne pouvons accéder, par cette photo, qu'à la connaissance de rayonnement électromagnétique visible et donc des photons associés.

**b.** Le texte introductif nous indique que le compteur Geiger détecte parmi les particules et rayonnements émis lors de l'éruption, les électrons et les rayonnements $\gamma$ et X.

**c.** Les signes – de la **figure 6** représentent les électrons arrachés et les signes + représentent les cations formés lors de l'arrachage de ces électrons.

**d.**




**e.** On appelle $d$ la distance Terre-Soleil. La durée $\tau$ du parcours est $\tau = \frac{d}{c} = \frac{150.10^9}{3{,}00.10^8} = 500$ s.

**f.** La durée de parcours des particules est d'environ 1 jour 11 h (parties le 7 juin 2011 à 6 h 41 GMT, arrivées vers 18 h GMT le 8 juin 2011 d'après le texte) donc 35 h soit $126.10^3$ s ce qui donne pour ordre de grandeur $10^5$ s. L'ordre de grandeur de la distance séparant la Terre du Soleil est $10^{11}$ m donc l'ordre de grandeur de la vitesse est de $\frac{10^{11}}{10^5} = 10^6$ m.s$^{-1}$ (soit 100 fois moins que l'ordre de grandeur de la vitesse de la lumière)

**g.** L'observation permanente du Soleil permet la détection en temps réel (avec 500 s de décalage) d'une éruption solaire, alors que les particules arrivent au bout de près d'un jour et demi. Les effets néfastes dus aux particules sur les communications par satellites et les appareils électroniques des avions en particulier peuvent donc être prévus avec plus d'une journée d'avance, ce qui permet de prendre des précautions et d'anticiper le phénomène.

### *Commentaires*

Le compteur Geiger Müller fonctionne sur le principe de l'avalanche électronique : le rayonnement ionisant qui pénètre dans le compteur arrache des électrons qui à leur tour en arrachent d'autres. Cela entraîne la mise en saturation rapide du compteur avec pour conséquence une non différenciation des différents types de particules, le résultat obtenu étant le même quelle que soit la nature des particules. Ce mode de fonctionnement rend, en revanche, ce détecteur sensible à des flux très faibles.

## 3 Séisme, étude et conséquences

**(p. 34)**

### *Objectif*

Cette activité prend en charge l'étude d'un détecteur d'ondes mécaniques (le sismographe), l'exploitation d'informations sur la propagation d'une onde mécanique (ondes P et S) aboutissant à un calcul de célérité.

### *Correspondance avec le programme*

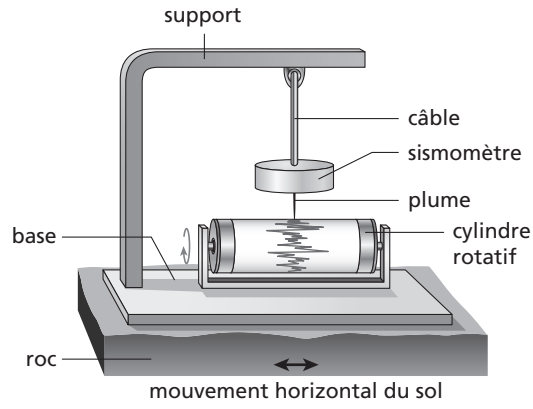
- Extraire et exploiter des informations sur :
  – des sources d'ondes et de particules et leur utilisation.
  – des dispositifs de détection.
- Extraire et exploiter des informations sur les manifestations des ondes mécaniques dans la matière
- Connaître la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité)

### *Corrigé*

**a.** Pour les ondes P la déformation du milieu a pour direction celle du déplacement de l'onde, donc elle est longitudinale.
Pour les ondes S la direction de la déformation est perpendiculaire à la direction de propagation donc c'est une onde transversale.

**b.** Lors du tremblement de Terre, le socle (en beige dans le manuel de l'élève), le support, le ressort et le tambour rotatif sont mis en mouvement contrairement à la masse et au stylo accrochée à elle.
Cette inertie de la masse est utilisée pour évaluer l'amplitude verticale des perturbations liées au séisme.

**c.**



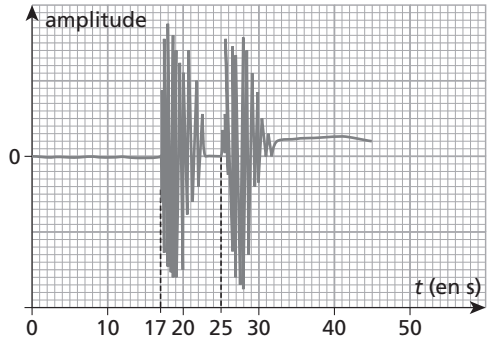
**d.** On aperçoit, sur la photo de la médiathèque de Sendai, des piliers métalliques permettant une flexibilité, chaque étage n'étant lié aux autres que par ces piliers. Un mouvement horizontal dû à un séisme entraînerait donc une déformation du bâtiment sans rupture, chaque étage pouvant bouger selon l'horizontale de manière assez indépendante des autres étages.

**e.** Pour les ondes S la durée de parcours est :

$$t_S = \frac{100}{4{,}0} = 25 \text{ s}.$$

Elle vaut $t_P = \frac{100}{6{,}0} = 17$ s pour les ondes P.

**f.** On obtient l'enregistrement suivant :




### *Commentaires*

Le choix a été fait de ne traiter que les ondes de types P et S, qui sont des ondes de fond, et de ne pas aborder les ondes L (Love) et R (Rayleigh) qui sont des ondes de surface. Les premières (P et S) sont plus simples à étudier pour des élèves car leur modélisation en ondes longitudinales et transversales est assez simple. Mais ce sont les ondes L et R qui sont à l'origine des destructions et qui sont détectées par les appareils en surface. Ces ondes résultent de l'interférence des ondes P et S lorsque celles-ci arrivent à la surface depuis l'épicentre.

### LIENS UTILES

**1** http://www.youtube.com/watch?v=tWzKHn5gT2g&feature=related

**2** http://www.artevod.com/architectureslame-diatheque desendai

**3** http://www.lemoniteur.fr/157-realisations/article/actualite/846061-le-seisme-japonais-vecu-de-l-interieur-de-la-mediatheque-de-sendai

## 4 Propagation d'un tsunami (p. 35)

### *Objectif*

Cette activité, qui s'appuie sur les données du tsunami ayant eu lieu au Japon en 2011, permet :
– de comprendre qu'il s'agit d'une vague unique, en particulier en étudiant un document qui représente une sorte de chronologie du tsunami.
– d'étudier la vitesse de propagation du tsunami en effectuant une représentation graphique et en étudiant le modèle linéaire qui l'accompagne.

### *Compétences mises en jeu*

- Extraire et exploiter des informations sur les manifestations des ondes mécaniques dans la matière.
- Connaître la relation entre retard, distance et vitesse de propagation (célérité)

### *Corrigé*

**a.** En haute mer, le tsunami a une faible amplitude mais une grande vitesse, à l'approche des côtes, sa vitesse diminue mais son amplitude augmente.

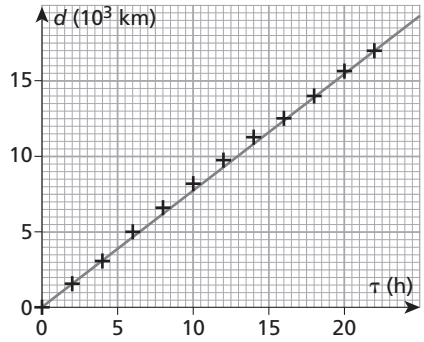
**b.** Le document de la **figure 10** du manuel de l'élève n'est pas une vision du tsunami à un instant donné mais l'évolution chronologique du tsunami à son approche des côtes. On constate bien l'augmentation de l'amplitude de la vague à l'approche de la côte.

**c.** Le document indique une durée de propagation d'environ 22 h pour atteindre la côte ouest du Chili. La célérité moyenne du tsunami est donc :

$$v = \frac{17.10^3}{22} = 7{,}7.10^2 \text{ km.h}^{-1}$$

**d.**

| $d$ ($10^3$ km) | $\tau$ (h) |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 1,6 | 2 |
| 3,6 | 4 |
| 5 | 6 |
| 6,6 | 8 |
| 8,2 | 10 |
| 9,8 | 12 |
| 11,3 | 14 |
| 12,5 | 16 |
| 14 | 18 |
| 15,6 | 20 |
| 17 | 22 |




Le coefficient directeur de la droite vaut $7{,}9.10^2$ km.h$^{-1}$ ce qui est comparable à la vitesse calculée au **c.**

**e.** Le tsunami se propageant dans toutes les directions qui lui sont offertes à partir du Japon perd de son intensité car l'énergie qu'il transporte se répartit dans toutes les directions et est dissipée en partie en mer lors de sa progression vers les côtes des Amériques.

### *Commentaires*

• Le terme *tsunami* est un mot japonais composé de tsu « port » et de nami, « vague » ; il signifie littéralement « vague portuaire » ou « vague de port ».

• Il peut être intéressant d'indiquer aux élèves qu'une fois le tsunami arrivant sur Terre, le modèle d'onde progressive n'est plus adapté puisqu'il y a une réelle propagation de matière comme les images de cet événement nous l'ont montré.

• Concernant la question **c.**, la célérité d'un tsunami dépend de la profondeur de l'eau. Elle vaut par exemple 870 km.h$^{-1}$ pour une profondeur de 6 km et 360 km.h$^{-1}$ pour une profondeur d'un kilomètre.

• Concernant la question **d.**, le fait que les points vérifient un modèle linéaire indique que la propagation du tsunami est quasiment uniforme, tout du moins dans la direction étudiée. Elle ne l'est manifestement pas en direction de la mer des Célèbes, par exemple.

## 5 Mesure de la célérité du son et écho-détection (p. 36)

### *Objectif*

Cette activité utilise un émetteur et un récepteur d'ultrasons dans le but d'effectuer une mesure de célérité du son dans l'air de manière simple et classique.

Elle est aussi l'occasion de prendre en compte des mesures d'incertitudes, liées aussi bien aux mesures de longueurs qu'aux mesures de durées faites avec le logiciel ExAO.

La dernière partie du TP nécessite que l'élève propose un protocole. C'est une occasion de l'entraîner à l'évaluation des compétences expérimentales où ce type de démarche d'investigation est attendu.

### *Correspondance avec le programme*

• Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection.

• Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde.

### *Liste de matériel*

• Un émetteur ultrason et un récepteur ultrason

• Un système ExAO, des câbles (éventuellement coaxiaux).

• Des morceaux de tissus, de mousse, plaque métallique, morceau de carton, morceau de bois (forme rectangulaire environ 10 cm $\times$ 10 cm).

### *Corrigé*

**a.** La valeur des incertitudes dépend des outils utilisés et de la précision de leur mesure. Il faut aussi bien situer la position de l'émetteur ultrasonore proprement dit selon le matériel utilisé. L'incertitude en fonction de ces paramètres peut varier de 1 mm à 1 cm. L'incertitude associée au retard est déterminée en effectuant plusieurs fois la mesure sur l'écran avec les outils informatiques à disposition (réticule par exemple).

**b.** La valeur obtenue est à comparer à la valeur classique de 340 m.s$^{-1}$ tout en discutant les conditions de pression et de température et en tenant compte des incertitudes évaluées.

**c.** Le retard augmente et l'amplitude du signal diminue.

**d.** Utiliser les fonctionnalités du tableur-grapheur pour déterminer la droite modélisant les mesures et en déduire le coefficient directeur qui donne la valeur de la célérité moyenne des ultrasons dans l'air dans les conditions de l'expérience.

**e.** Utiliser une plaque métallique (ou le mur de la salle) comme écran. Il faut être capable de déterminer la plus petite variation de distance détectable entre l'écran et l'émetteur-récepteur, donc la plus petite variation mesurable sur l'écran de l'ordinateur. Déplacer l'écran jusqu'à ce que le décalage entre le signal émis et le signal reçu soit mesurable. Mesurer la distance dont l'écran a été déplacé.

**f.** Pour tester l'effet de matériaux différents, l'écran peut être remplacé par une plaque en bois par exemple ou un morceau de mousse. Il est aussi possible de conserver l'écran métallique et d'interposer entre la plaque et l'ensemble émetteur-récepteur un matériau comme tissu ou un mouchoir en papier.
Différents phénomènes sont alors observables (absorption, réflexion, transmission). L'observation de l'amplitude du signal reçu renseigne sur le type de matériau. L'apparition d'une autre salve due à la réflexion partielle sur un obstacle peut également être observée.

***Commentaires***

• Pour utiliser un émetteur simple d'ultrasons de 40 kHz en émetteur de salves, il suffit de l'alimenter par une tension créneau ou TTL. Chaque variation de tension aux bornes de l'émetteur provoque l'émission d'une salve d'ultrasons de 40 kHz. La fréquence de la tension créneau est à régler en accord avec les paramétrages informatiques afin de n'avoir à l'écran qu'une salve émise. Il suffit pour cela que la durée d'acquisition soit inférieure à la demi-période du signal créneau. Ainsi pour une fréquence de 100 Hz, la durée d'acquisition doit être inférieure à 5 ms. Il est aussi pratique de relier la sortie TTL du GBF à la borne de synchronisation externe de l'interface pour obtenir un déclenchement de l'acquisition (déclenchement externe) lorsque la salve est émise. Ainsi, la durée de propagation est mesurée directement. Il est possible d'observer un signal reçu qui semble instantané : c'est une propagation hertzienne. Elle peut être réduite en utilisant des câbles coaxiaux pour connecter l'émetteur et l'interface d'acquisition au GBF.

• Quelques valeurs de la vitesse du son en fonction de la température et de la pression :

Sous une pression de 1 atm :

| **Vitesse du son** ($m.s^{-1}$) | 325 | 331 | 338 | 343 | 349 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Température** (°C) | – 10 | 0 | 10 | 20 | 30 |

Vitesse du son en fonction de l'altitude, de la pression et de la température dans l'air :

| **Altitude** (m) | 0 | 600 | 1 000 | 3 000 | 8 000 |
|---|---|---|---|---|---|
| **Pression** (hPa) | 101 | 94 | 90 | 70 | 36 |
| **Température** (°C) | 15 | 11 | 8,5 | 4,5 | – 37 |
| **Vitesse du son** ($m.s^{-1}$) | 340 | 338 | 336 | 329 | 308 |

## Exercices

### 1 Vrai ou faux ? (1)

**a.** Faux : seule une partie des UV est arrêtée par l'atmosphère.

**b.** Faux : ils émettent un rayonnement infrarouge.

**c.** Faux : les ondes radio n'interagissent pas avec l'atmosphère et peuvent donc être étudiées par des instruments d'observation terrestres.

### 2 Particules ou rayonnements ?

Particules : protons ; photons ; électrons.

Rayonnements : ultraviolet ; X ; $\gamma$ ; infrarouge ; radio.

### 3 Vrai ou faux ? (2)

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

### 4 Vrai ou faux ? (3)

**a.** Faux : il faut un support matériel au son pour se propager et le vide règne entre la Terre et la Lune.

**b.** Faux : elle se propage aussi dans les solides.

**c.** Vrai : la célérité d'une onde dépend du milieu de propagation.

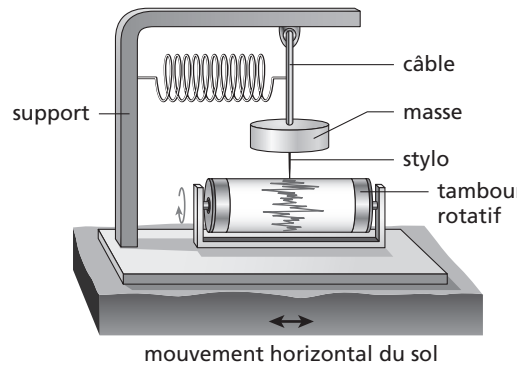
**d.** Faux : la pression régnant dans le milieu a aussi une influence, ainsi que le milieu de propagation.

### 5 Sismographe

**a.** Le sismographe est fait de telle manière que tout soit mis en mouvement sauf la masse et le stylo qui lui est relié.

**b.** Pour augmenter la sensibilité du sismographe, il est possible d'utiliser un ressort moins raide ou une masse plus grande.
Un ressort de raideur plus importante ou une masse plus importante peuvent limiter l'amplitude des oscillations enregistrées et donc limiter l'observation des petites secousses sismiques.

**c.**



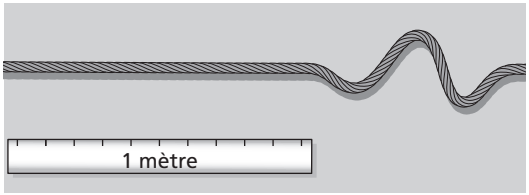
### 6 Départ d'une course

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

### 7 Onde le long d'une corde

**a.** Cette onde est transversale car la perturbation est perpendiculaire à la direction de propagation.

**b.** La distance parcourue est $5{,}0 \times 0{,}20 = 1{,}0$ m. La perturbation se retrouve donc 1,0 m plus loin.




### 8 Ondes dans un tuyau

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

### 9 Le sonar des dauphins

**a.** La distance parcourue est 20 m, donc le temps de parcours est :

$$\frac{20}{1{,}5.10^3} = 13.10^{-3} = 13 \text{ ms.}$$

**b.** Il faut que la distance parcourue par le dauphin soit inférieure à la distance parcourue par les ultrasons. Pour éviter l'obstacle il faut que les ultrasons ai été réfléchis.

Donc la vitesse du dauphin soit être inférieure à la vitesse des ultrasons, ce qui est bien la cas (un dauphin se déplace à une vitesse maximale de 60 $km.h^{-1}$ soit environ 17 $m.s^{-1}$).

## Entraînement

### 10 Critique d'un schéma

**a.** Le schéma ne nous renseigne que sur le rayonnement visible émis par le Soleil.

Il peut donc faire croire que seul un rayonnement électromagnétique visible est émis par le Soleil, ce qui est faux. Comme il représente des couleurs séparées, il laisse croire que le milieu situé entre le Soleil est la Terre est dispersif ce qui est aussi faux puisqu'il s'agit du vide.

**b.** Il donne à penser que le rayonnement ultraviolet est intégralement réfléchi par l'atmosphère, or une partie du rayonnement UV pénètre l'atmosphère.

**c.** Il ne nous donne aucune information concernant les particules émises par le Soleil, si ce n'est les photons, ceux-ci pouvant être vus comme une autre interprétation du rayonnement électromagnétique.

### 11 Éruptions solaires

**a.** Des protons, des ions, des électrons et des photons sont émis lors d'une éruption solaire.

**b.** Les rayons X et les ultraviolets se propagent à la vitesse de la lumière dans le vide, $3{,}00.10^8$ $m.s^{-1}$. Les protons solaires parcourent la distance Terre-Soleil en une heure environ donc ils se déplacent à $150.10^6$ $km.h^{-1}$ (soit $4{,}2.10^7$ $m.s^{-1}$).

**c.** Les rayons X et les ultraviolets sont suffisamment pénétrant pour perturber les communications radioélectriques donc leurs effets sont ressentis sur Terre. Les particules chargées (protons, ions et électrons) ont plutôt un effet en haute atmosphère.

**d.** Pour étudier les rayons X et les ultraviolets, des détecteurs sur Terre ou en basse atmosphère (ballons sonde par exemple) sont suffisants. Pour étudier les particules chargées, il est nécessaire d'utiliser des capteurs hors atmosphère positionnés sur des satellites.

### 12 Absorption par l'atmosphère

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

### 13 Séisme

**a.** Le premier train d'ondes reçu est enregistré à 9 h 16 min 10 s et le second à 9 h 16 min 22 s.

**b.** Ce n'est pas un retard au sens défini dans le cours car les deux trains d'onde sont enregistrés au même endroit et il s'agit de deux ondes différentes.

**c.** La célérité $v_1$ du premier train d'onde émis à 9 h 15 min 25 s, reçu à 9 h 16 min 10 s, soit 45 s plus tard, est calculée sachant qu'il a parcouru 99,5 km, donc $v_1 = \frac{99{,}5}{45} = 2{,}2$ $km.s^{-1}$.

La célérité $v_2$ du second train d'onde émis à 9 h 15 min 25 s, reçu à 9 h 16 min 22 s soit 57 s plus tard est, de même, $v_2 = \frac{99{,}5}{57} = 1{,}7$ $km.s^{-1}$.

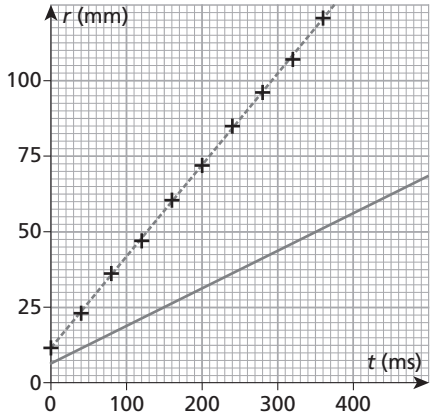
### 14 Célérité du son dans l'air

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 632.*

### 15 Propagation d'une vague

**1.** La caméra filme à 25 images par seconde, donc une image toutes les 0,04 s. On repère la prise d'image avec $t = 0$ s pour l'image 1 d'où le tableau :

| image | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $r$ (mm) | 12 | 23 | 36 | 47 | 61 | 72 | 85 | 96 | 107 | 121 |
| date $t$ (ms) | 0 | 40 | 80 | 120 | 160 | 200 | 240 | 280 | 320 | 360 |




L'onde n'a pas été crée au début de la vidéo car $r > 0$ pour $t = 0$ s. La droite modèle est en pointillés sur le graphe.

La célérité de l'onde correspond à la pente de cette droite donc pour une variation d'ordonnée de $121 - 36 = 85$ mm $= 85.10^{-3}$ m , il y a une variation d'abscisse de $360 - 80 = 280$ ms $= 280.10^{-3}$ s

Donc $c = \dfrac{83.10^{-3}}{280.10^{-3}} = 0{,}30$ m.s$^{-1}$

**2.a.** Si la profondeur est inférieure, la vitesse est inférieure, ce qui conduit, par exemple, à tracer la droite en traits pleins sur le graphe dont la pente est inférieure à celle de la droite en traits pointillés

**b.** Le tsunami en haute mer se propage donc plus vite que lors de son arrivée sur les côtes.

### 16 Vitesse d'une péniche

**a.** $\sqrt{gh}$ a la même unité que la vitesse donc m.s$^{-1}$ donc $gh$ a pour unité m$^2$.s$^{-2}$.

Or $g$ s'exprime en m.s$^{-2}$ donc $h$ s'exprime en m.

La relation $\sqrt{gh}$ est issue de l'expression de la vitesse déterminée par le modèle d'Airy avec comme domaine de validité des eaux peu profondes. Elle est donc bien adaptée à la profondeur des eaux d'un canal mais pas aux vagues se propageant à la surface de la mer.

**b.** $v = \sqrt{gh} = \sqrt{3{,}0 \times 9{,}8} = 5{,}4$ m.s$^{-1}$.

**c.** $v_{min} = 1{,}25v = 6{,}8$ m.s$^{-1}$

**d.** Plus les canaux sont profonds, plus la vitesse des ondes est grande et donc plus la vitesse minimale de la péniche est élevée ce qui entraîne un surcoût de carburant, voire rend la valeur minimale inaccessible.

## Exercices de BAC

### 17 Relief du fond marin avec sondeur

**I.1.** Une onde mécanique progressive est le phénomène de propagation d'une perturbation dans un milieu matériel. Elle s'accompagne d'un transport d'énergie sans transport de matière.

**2.** La lumière, contrairement aux ondes mécaniques, peut se propager dans le vide. La lumière nous provenant du Soleil est un exemple de cette propagation.

**II.1.** Le son se propage plus vite dans l'eau que dans l'air donc le déclenchement doit se faire sur la voie recevant le signal en premier : la voie B.

**2.** Le retard entre les réceptions est $\tau = t_{air} - t_{mer}$.

**3.a.** La durée de propagation dans l'air est

$$t_{air} = \frac{d}{v_{air}}$$

La durée de propagation dans l'air est $t_{mer} = \dfrac{d}{v_{mer}}$

donc $\tau = \dfrac{d}{v_{air}} - \dfrac{d}{v_{mer}} = d\left(\dfrac{1}{v_{air}} - \dfrac{1}{v_{mer}}\right)$

**b.** L'expression précédente montre bien la proportionnalité entre $\tau$ et $d$ ce qui correspond à la fonction linéaire modélisant les mesures effectuées.

**c.** La droite passe par les points de coordonnées (0 ; 0) et (1,1 ; 2,5) ce qui donne pour coefficient directeur $a = \dfrac{2{,}5.10^{-3}}{1{,}1} = 2{,}3.10^{-3}$ s.m$^{-1}$. Ce coefficient directeur s'écrit également $a = \left(\dfrac{1}{v_{air}} - \dfrac{1}{v_{mer}}\right)$

donc $v_{mer} = \left(\dfrac{1}{v_{air}} - a\right)^{-1} = 1{,}6.10^3$ m.s$^{-1}$.

**III.1.a.** La réception de l'écho se fait après l'émission donc la voie 1 correspond au signal émis et la voie 2 au signal reçu après écho.

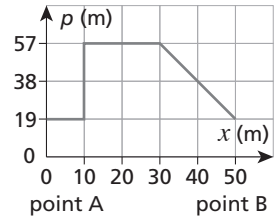
**b.** Le retard est $\tau = 25$ ms.

**c.** Un carreau correspond donc à 25 ms.

**2.** Le signal faisant un aller-retour entre l'émission et la réception, la relation est $p = v_{mer}\dfrac{\tau}{2}$.

**3.** Pour $\tau = 25$ ms on a donc

$$p = 1{,}5.10^3 \times \frac{25.10^{-3}}{2} = 19 \text{ m.}$$



**4.** Pour $p = 360$ m, $\tau = \dfrac{2p}{v_{mer}} = \dfrac{360 \times 2}{1{,}5.10^3} = 0{,}48$ s.

Une période supérieure à 0,48 s (0,50 s par exemple) semble donc adaptée pour éviter le chevauchement.

### 18 Un séisme dans le Jura

**1.a.** Les ondes P ayant une célérité supérieure à celle des ondes S, les ondes P sont détectées en premier donc elles correspondent au premier train d'onde sur le document.

**b.** Les ondes P sont détectées à la date $t_P =$ 18 h 31 min 15 s et les ondes S sont détectées à la date $t_S =$ 18 h 31 min 20 s.

**c.** La célérité des ondes S est $v_S = \dfrac{d}{t_S - t_0}$, celle des ondes P est $v_P = \dfrac{d}{t_P - t_0}$.

**d.** On en déduit $t_0 = t_S - \dfrac{d}{v_S}$ puis $v_P = \dfrac{d}{t_P - t_S + \dfrac{d}{v_S}}$

d'où $d = \dfrac{v_S v_P}{v_P - v_S}(t_S - t_P)$

**e.** L'application numérique donne :

$$d = \frac{3{,}5 \times 6{,}0}{6{,}0 - 3{,}5} \times 5 = 4.10^1 \text{ km.}$$

**2.a.** Les ondes se propagent dans toutes les directions à partir de l'épicentre.

**b.** Par définition, une onde se propage sans transport de matière. Il y a transport d'énergie.

**c.** Une onde est longitudinale lorsque la direction de la déformation est la même que la direction de la propagation.

**d.** Il s'agit de valeurs moyennes car les célérités varient en fonction des milieux matériels et pour parvenir de l'épicentre au sismographe, différents milieux (couches géologiques) ont été traversés.

### 19 Rayonnements et particules

**1.a.** Un type de rayonnement utilisé en médecine est par exemple les rayons X, utilisés en radiologie.

**b.** Les rayonnements visibles émis par les étoiles sont un rayonnement cosmique.

**2.** Les sources radioactives émettent des rayonnements $\gamma$ qui ne sont pas des rayonnements infrarouges. Le corps renferme un certain nombre de noyaux radioactifs

**3.a.** Une source radioactive émet des rayonnements et des particules ($\alpha$ et $\beta$ par exemple).

**b.** Le soleil émet aussi vers la Terre des particules (photons, positrons et électrons).

**c.** Il faudrait modifier le document en indiquant pour les sources cosmiques et telluriques : rayonnements et particules à la place de rayonnements.

**4.** Le compteur Geiger détecte des particules ($\beta$) et des rayonnements (X et $\gamma$).

**5.** Une part des rayonnements et particules étant stoppés en haute atmosphère, il faut utiliser des capteurs disposés sur des satellites pour étudier le plus complètement possible les émissions cosmologiques.

## Rédiger une synthèse de documents

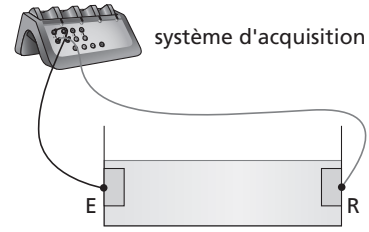
### 20 Les ultrasons

*Analyse de la question*

Il s'agit de décrire le dispositif de mesure, puis expliquer le principe de la mesure

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1. Le dispositif de mesure**




Le dispositif est constitué d'un **émetteur** (E) et d'un **récepteur** (R) ultrasonores que l'on plonge dans le jus de canne. L'émission d'une **salve d'ultrasons** déclenche un chronomètre qui s'arrête lorsque le récepteur reçoit la salve émise, ce qui détermine la **durée de parcours** ($\tau$). La distance séparant l'émetteur du récepteur étant connue ($d$), la **célérité** des ultrasons ($v$) se déduit en calculant $v = \dfrac{d}{\tau}$.

**2. Principe de la mesure**

La mesure du taux de sucre dans le sucre de canne s'effectue en mesurant la **vitesse des ultrasons** dans le jus de sucre de canne. **Cette vitesse dépend du taux de sucre**, ce qui permet, par utilisation d'une **courbe d'étalonnage** par exemple, de déterminer de taux de sucre dans le jus de canne et de choisir le moment idéal pour la récolte. Pour pouvoir faire correspondre célérité et taux de sucre, il faut avoir au préalable effectué des mesures permettant un **étalonnage**. Pour cela le même dispositif est utilisé pour des solutions dont on connaît le taux de sucre. Pour information, le pourcentage en masse de saccharose dans la canne à sucre est en moyenne de 12 à 15 %.

# Chapitre 2 Ondes périodiques. Acoustique

## Introduction au chapitre (p. 54)

Ce chapitre aborde d'abord les ondes périodiques en général, en particulier les ondes sinusoïdales, en définissant les notions de période $T$, de fréquence $f$, de longueur d'onde $\lambda$. Puis, il traite les ondes acoustiques en définissant notamment des notions propres aux sons musicaux (hauteur, timbre) et aux sons en général (niveau sonore). Il s'inscrit dans la suite du chapitre 1, qui traite en particulier des ondes progressives.

Le choix a été d'aborder, à travers les activités et les exercices, des ondes périodiques variées, choisies dans différents domaines de la physique, afin d'en illustrer la grande diversité. Le chapitre aborde des exemples d'ondes périodiques à la surface de l'eau, d'ondes électromagnétiques et d'ondes sonores.

Conformément aux attentes du programme, une activité expérimentale traitant de la période $T$, de la fréquence $f$, de la longueur d'onde $\lambda$ et de la célérité $v$ est abordée sur l'exemple des ultrasons. Une activité expérimentale, ainsi qu'un grand nombre d'exercices, sont réservés à l'étude des sons musicaux.

Les prérequis sont les notions du chapitre 1 (ondes progressives, retard, célérité) et les connaissances sur les ondes, vues en Seconde.

## Activités

### 1 Des ondes à la surface de l'eau (p. 56)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

#### *Objectif*

L'objectif de cette activité est d'analyser des photos d'expériences réalisées sur une cuve à ondes. Elle permet d'aborder les notions de fréquence $f$ (ou période $T$), de longueur d'onde $\lambda$ et la relation qui lie ces deux grandeurs. Elle aborde également des notions sur les incertitudes et sur les paramètres pouvant influencer la célérité $v$ des ondes (forme de l'onde et fréquence de la source). Bien que n'apparaissant pas explicitement dans le programme, la notion de milieu dispersif est implicitement abordée.

#### *Correspondance avec le programme*

• Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde.

• Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.

#### *Corrigé*

**a.** Chaque point de la surface de l'eau vibre à la fréquence $f$ imposée par la source puisque chaque point retranscrit avec un certain retard les perturbations imposées par la source.

**b.** A et B vibrent en phase car ils possèdent la même élongation à chaque instant (notamment l'instant de la prise de vue de la photo). Ils sont séparés de six longueurs d'onde.

**c.** La toise permet de trouver la distance AB égale à $6\lambda$. Soit $6\lambda = 6{,}3$ cm. Donc, la longueur d'onde vaut $\lambda = 1{,}05$ cm. La mesure de la distance AB s'effectuant à la règle graduée en mm, il y a une incertitude de positionnement de la règle à chaque extrémité de 0,5 mm. Donc, l'incertitude absolue $\Delta(AB)$ est de 1 mm. L'incertitude relative sur la mesure de la distance AB vaut $\frac{\Delta(AB)}{AB} = 0{,}016$. Or $\frac{\Delta(AB)}{AB} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0{,}016$. Donc l'incertitude absolue $\Delta\lambda$ vaut $\Delta\lambda = 0{,}016\ \lambda = 0{,}017$ cm $= 0{,}2$ mm.
Ainsi la longueur d'onde vaut $\lambda = 1{,}05 \pm 0{,}02$ cm.

**d.** La célérité $v$ de l'onde est déterminée par $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = 1{,}05.10^{-2} \times 20 = 0{,}210$ m.s$^{-1}$. L'incertitude relative sur la célérité est $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta f}{f}$.
L'énoncé affiche une fréquence $f = 20$ Hz. Donc l'incertitude absolue $\Delta f$ est égale à $\Delta f = 0{,}5$ Hz.
Ainsi $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta f}{f} = 0{,}016 + \frac{0{,}5}{20} = 0{,}041$.
Donc l'incertitude absolue $\Delta v$ vaut :
$\Delta v = 0{,}041 v = 0{,}041 \times 0{,}21 = 0{,}009$ m.s$^{-1}$.
Ainsi la célérité $v$ vaut $v = 0{,}210 \pm 0{,}009$ m.s$^{-1}$.

**e.** Pour la **figure 2** du manuel de l'élève, on peut lire quatre longueurs d'onde. En appliquant la même méthode, $4\lambda = 4{,}4$ cm donc la longueur d'onde $\lambda$ vaut $\lambda = 1{,}10$ cm.

L'incertitude absolue sur la mesure de $4\lambda$ est de 1 mm donc $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0{,}023$. Donc l'incertitude absolue $\Delta\lambda$ vaut $\Delta\lambda = 0{,}023\lambda = 0{,}025$ cm $= 0{,}3$ mm.

Ainsi la longueur d'onde vaut $\lambda = 1{,}10 \pm 0{,}03$ cm.

La célérité vaut alors :

$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = 1{,}10.10^{-2} \times 20 = 0{,}220$ m.s$^{-1}$.

$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta f}{f} = 0{,}023 + \frac{0{,}5}{20} = 0{,}048$.

Donc l'incertitude absolue $\Delta v$ vaut :

$\Delta v = 0{,}048v = 0{,}048 \times 0{,}22 = 0{,}011$ m.s$^{-1}$.

Ainsi la célérité $v$ vaut $v = 0{,}220 \pm 0{,}011$ m.s$^{-1}$.

L'intervalle de confiance se recouvre avec celui de la célérité calculée à la question **d**. Donc la forme de l'onde (ondes planes pour la **figure 1** p. 56 du manuel de l'élève et ondes circulaires pour la **figure 2**) n'influe pas sur la célérité de l'onde.

Pour la **figure 3,** on peut lire dix longueurs d'onde : $10\lambda =$ 9,2 cm donc la longueur d'onde $\lambda$ vaut $\lambda = 0{,}92$ cm. L'incertitude absolue sur la mesure de $10\lambda$ est de 1 mm donc $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0{,}011$.

Donc l'incertitude absolue $\Delta\lambda$ vaut :

$\Delta\lambda = 0{,}011\lambda = 0{,}010$ cm $= 0{,}1$ mm.

Ainsi la longueur d'onde vaut $\lambda = 0{,}92 \pm 0{,}01$ cm.

La célérité vaut alors :

$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = 0{,}92.10^{-2} \times 20 = 0{,}184$ m.s$^{-1}$.

$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta f}{f} = 0{,}011 + \frac{0{,}5}{20} = 0{,}036$.

Donc, l'incertitude absolue $\Delta v$ vaut :

$\Delta v = 0{,}036v = 0{,}036 \times 0{,}184 = 0{,}007$ m.s$^{-1}$.

Ainsi la célérité $v$ vaut $v = 0{,}184 \pm 0{,}007$ m.s$^{-1}$.

L'intervalle de confiance ne recouvre pas celui de la célérité calculée à la question **d**. Donc la fréquence $f$ permet de faire varier la célérité $v$. L'eau est un milieu dispersif pour ce type d'ondes.

**f.** En modifiant deux paramètres à la fois, il est impossible de savoir lequel a une influence sur la célérité $v$ de l'onde. Il est indispensable de faire varier les paramètres indépendamment les uns des autres afin d'étudier l'influence de chacun sur la célérité $v$.

### *Commentaires*

• Pour la question **c.** il existe en réalité un rapport différent de 1 entre les distances mesurées sur l'écran (photo) et les distances réelles sur la cuve. Par souci de simplification, les toises apparaissant sur chaque figure correspondent à celles de la réalité de la surface de l'eau.

• Pour la question **d.** il faut habituer les élèves à la notion d'incertitudes. Quand un énoncé propose la valeur d'une grandeur (ici la fréquence), sans incertitude absolue associée, alors cette dernière est égale à la moitié du dernier chiffre significatif.

Il est possible de réaliser ces expériences en utilisant le matériel suivant : une cuve à ondes munie d'une soufflerie (avec choix de fréquences différentes), une toise collée directement sur l'écran dépoli de la cuve, un appareil photo numérique et un ordinateur.

## 2 Ondes électromagnétiques (p. 57)

### *Objectif*

L'objectif de cette activité est d'analyser un document sur des ondes électromagnétiques de fréquences variées. Elle permet aussi de comparer les ondes issues d'un four micro-ondes, du réseau Wi-Fi et du réseau téléphonique 4G. Elle permet de travailler la relation qui lie la fréquence $f$ (ou période $T$), la longueur d'onde $\lambda$ et la célérité $v$.

### *Correspondance avec le programme*

• Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde.

• Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.

### *Corrigé*

**a.** $f = \frac{c}{\lambda}$.

Pour $\lambda = 400$ nm, $f = \frac{3{,}0.10^{8}}{400.10^{-9}} = 7{,}5.10^{14}$ Hz.

Pour $\lambda = 800$ nm, $f = \frac{3{,}0.10^{8}}{800.10^{-9}} = 3{,}8.10^{14}$ Hz.

**b.** $v = \frac{\lambda}{T}$. Donc la célérité $v_{air}$ de l'onde issue du laser vaut $v_{air} = \frac{633.10^{-9}}{2{,}1.10^{-15}} = 3{,}0.10^{8}$ m.s$^{-1}$. Cette valeur est identique à celle de la célérité $c$ des ondes électromagnétiques dans le vide.

**c.** La photo de l'arrière du four à micro-ondes renseigne sur la fréquence $f$ des ondes associées : $f =$ 2 450 MHz. La longueur d'onde associée vaut $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3{,}0.10^{8}}{2450.10^{6}} = 0{,}12$ m.

Le texte renseigne sur la longueur d'onde $\lambda$ du réseau Wi-Fi : $\lambda$ est voisine de 12 cm, soit $\lambda = 0{,}12$ m. Pour le réseau 4G, la fréquence est de l'ordre de 2,6 GHz. $\lambda = \dfrac{c}{f} = \dfrac{3{,}0.10^8}{2{,}6.10^9} = 0{,}12$ m.

Ainsi, pour ces trois ondes, la longueur d'onde $\lambda$ vaut 0,12 m. La **figure 4** renseigne sur leur appartenance aux ondes radio. Elles ne peuvent pas ioniser la matière, leur longueur d'onde étant largement supérieure à 100 nm.

**d.** La comparaison des puissances rayonnées permet de conclure qu'un four micro-ondes en marche (1 mW au maximum) ne peut pas perturber un réseau Wi-Fi (100 mW), ni une conversation sur le réseau 4G (1 W).

### *Commentaires*

• Pour la question **b.** on peut prolonger en signalant que l'indice optique de l'air est $n = \dfrac{c}{v_{air}} = 1{,}0$.

Dans la suite, ce résultat est généralisée à toutes les ondes électromagnétiques, quelle que soit leur fréquence.

• Pour la question **c.** les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 100 nm agissent sur la matière vivante, c'est-à-dire sur les molécules d'ADN, en cassant les liaisons entre les atomes qui la composent ; ces atomes sont alors transformés en ions, c'est pourquoi on parle de rayonnements ionisants. Les rayonnements ionisants peuvent être d'origine naturelle (rayons cosmiques, telluriques), artificielle (exposition médicale) ou même accidentelle (Fukushima, Tchernobyl). La dose admise en moyenne par l'Homme est de l'ordre de 3 mSv par an.

## 3 Célérité des ultrasons dans l'air (p. 58)

### *Objectif*

L'objectif de cette activité est de réaliser des mesures de période $T$, de longueur d'onde $\lambda$ et de déterminer la célérité $v$ des ultrasons dans l'air. Des notions sur les incertitudes de mesures seront traitées conformément à l'esprit du programme.

### *Correspondance avec le programme*

• Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.

• Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.

### *Liste de matériel*

• Un générateur basse fréquence délivrant une tension sinusoïdale de fréquence proche de 40 kHz.
• Deux récepteurs d'ultrasons.
• Un émetteur d'ultrasons.
• Une alimentation réglable 30V-3A permettant d'alimenter l'émetteur.
• Une interface d'acquisition de fréquence d'échantillonnage assez élevée, de l'ordre de 100 kHz.
• Un ordinateur muni du logiciel adapté à l'interface.
• Des cordons de couleur rouge et noire.
• Un mètre-ruban.

Il est possible de n'utiliser que des récepteurs. Dans ce cas, un récepteur fait office d'émetteur en étant alimenté par le générateur basse fréquence avec une tension sinusoïdale de fréquence proche de 40 kHz. C'est le cas des photos **des figures 7** et **8** p. 58 du manuel de l'élève.

### *Corrigé*

**a.** La mesure de la période $T$ donne $T = 25{,}2$ µs soit $f = 39{,}7$ kHz. C'est très proche de 40 kHz.

**b.** L'incertitude absolue $\Delta T$ est estimée à l'aide du logiciel. Elle vaut $\Delta T = 0{,}2$ µs.

L'incertitude relative $\dfrac{\Delta T}{T}$ vaut $\dfrac{0{,}2}{25{,}2} = 8.10^{-3}$ soit 0,8 %.

**c.** Dix coïncidences correspondent à une distance $d = 8{,}4$ cm. Or, $d = 10\lambda$ donc :

$$\lambda = \frac{d}{10} = 0{,}84 \text{ cm} = 8{,}4.10^{-3} \text{ m}.$$

**d.** La mesure est effectuée à l'aide d'une règle graduée en mm donc l'incertitude absolue $\Delta d$ est égale à 0,5 mm = 0,05 cm.

L'incertitude relative vaut $\dfrac{\Delta d}{d} = \dfrac{\Delta\lambda}{\lambda} = \dfrac{0{,}05}{8{,}4} = 0{,}6\%$.

L'incertitude absolue $\Delta\lambda$ vaut :

$$\Delta\lambda = \lambda \times \frac{0{,}6}{100} = 5{,}0.10^{-5} \text{ m}.$$

**e.** La célérité $v$ de l'onde vaut :

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{8{,}4.10^{-3}}{25{,}2.10^{-6}} = 3{,}33.10^2 \text{ m.s}^{-1}.$$

L'incertitude relative $\dfrac{\Delta v}{v}$ vaut :

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta T}{T} = 0{,}006 + 0{,}008 = 0{,}014 \text{ soit } 1{,}4\ \%.$$

Ainsi, l'incertitude absolue $\Delta v$ vaut :

$\Delta v = 0{,}014 \times 3{,}33.10^2 = 4{,}7$ m.s$^{-1}$.

La valeur expérimentale $v_{exp}$ trouvée pour la célérité, assortie de son incertitude absolue vaut $v_{exp} = 333 \pm 5$ m.s$^{-1}$.

La valeur attendue $v_{att} = 3{,}4.10^2$ m.s$^{-1}$ est donnée avec deux chiffres significatifs. On peut donc écrire que $v_{att} = 340 \pm 5$ m.s$^{-1}$. Les intervalles de confiance de la mesure et de la valeur attendue se recoupent donc les deux valeurs sont compatibles.

**f.** Les sources d'erreurs sont les mesures de la période $T$ à l'aide du logiciel et de la distance $d$ à la règle graduée. Mesurer davantage de coïncidences (une vingtaine par exemple) et davantage de périodes $T$ avec le logiciel permettraient d'améliorer la précision de la mesure de $v$.

### *Commentaires*

• Cette activité nécessite un système d'acquisition informatisé, de fréquence d'échantillonnage élevée, de l'ordre de 100 kHz (la fréquence des ultrasons est de l'ordre de 40 kHz). Sinon, il est possible d'utiliser l'oscilloscope.

• Pour la question **b.**, l'estimation de l'incertitude absolue sur la mesure de la période $T$ s'effectue à l'aide de plusieurs périodes à l'aide du curseur. Il est possible d'estimer la valeur maximum $T_{max}$ et la valeur minimum $T_{min}$ de la période et de calculer l'incertitude absolue $\Delta T = T_{max} - T_{min}$.

## 4 Hauteur et timbre d'un son musical (p. 59)

### *Objectif*

L'objectif de cette activité est de comparer différents sons musicaux par l'intermédiaire d'une interface d'acquisition relié à un ordinateur. L'influence de paramètres (note et instrument) sur les sons permet d'aborder les notions de hauteur et de timbre, étudiées à la fois sur les signaux temporels et sur les spectres en fréquence.

### *Correspondance avec le programme*

Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical et l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.

### *Liste de matériel*

• Différents instruments (flûte, guitare…).
• Un diapason $la_3$ de 440 Hz.
• Un microphone.
• Une interface d'acquisition.
• Un ordinateur muni du logiciel adapté à l'interface. Le logiciel doit permettre de réaliser des spectres en fréquences.

### *Corrigé*

**a.** Les sons émis respectivement par un diapason et une guitare jouant un $la_3$ sont enregistrés sur les **figures 1** et **2** suivantes.

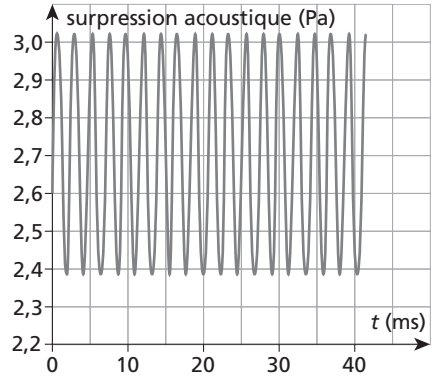



**Fig. 1** $la_3$ jouée par un diapason.

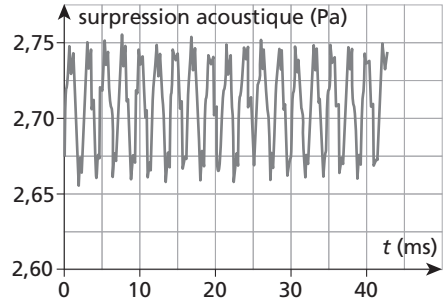



**Fig. 2** $la_3$ jouée par une guitare.

Les sons émis respectivement par une guitare et un harmonica jouant un $la_2$ sont enregistrés sur les **figures 3 et 4** suivantes.

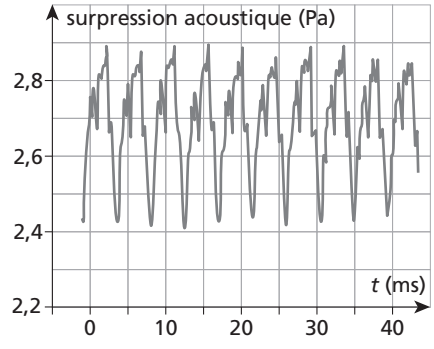



**Fig. 3** $la_2$ jouée par une guitare.

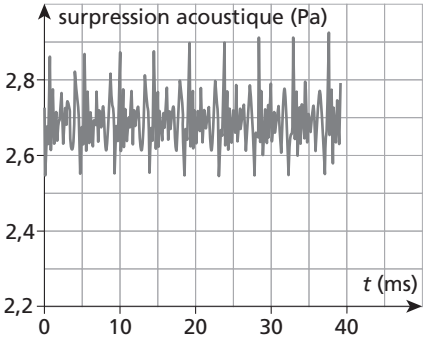



**Fig. 4** $la_2$ jouée par un harmonica.

Pour le $la_3$ **(Fig. 1** et **Fig. 2)**, la période $T$ est estimée à l'aide des fonctionnalités du logiciel.
Elle vaut $T = 2{,}3.10^{-3}$ s, identique pour les deux instruments.
La fréquence associée est :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2{,}3.10^{-3}} = 4{,}3.10^{2} \text{ Hz}.$$

Pour le $la_2$ **(Fig. 3** et **Fig. 4)**, la période est identique et vaut $T = 4{,}5.10^{-3}$ s. La fréquence associée est $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4{,}5.10^{-3}} = 2{,}2.10^{2}$ Hz.

Donc, pour une note déterminée, la fréquence $f$ est indépendante de l'instrument qui la joue.

**b.** La hauteur des notes est liée au caractère grave ou aigu du son. Elle est associée à la fréquence du signal temporel du son. Pour le $la_3$, la hauteur de la note est de $4{,}3.10^{2}$ Hz. Pour le $la_2$, elle est de $2{,}2.10^{2}$ Hz (plus grave que le $la_3$).

**c.** Deux sons émis par deux instruments différents jouant la même note possèdent un signal temporel de forme différente. Cette caractéristique différencie le timbre des instruments.

**d.** Les spectres en fréquence associés à chaque son de la première partie sont représentés sur les **figures 5 à 8** suivantes.

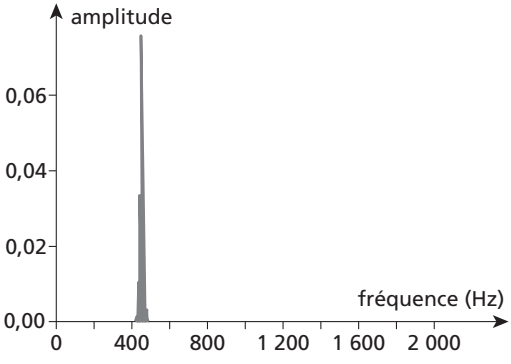



**Fig. 5** Spectre du son $la_3$ joué par un diapason.

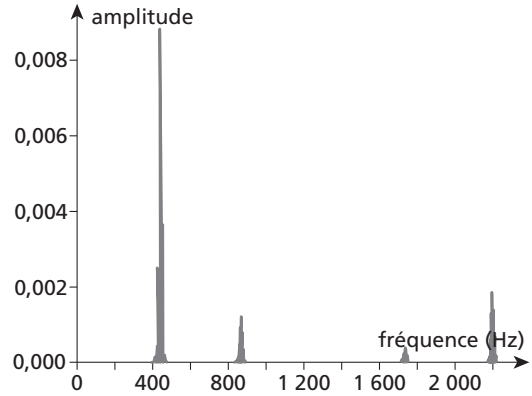



**Fig. 6** Spectre du son $la_3$ joué par une guitare.

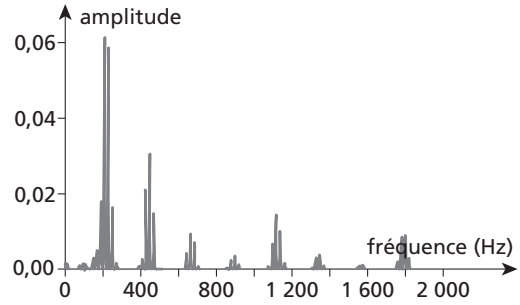



**Fig. 7** Spectre du son $la_2$ joué par une guitare.

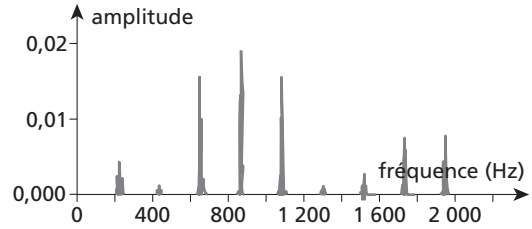



**Fig. 8** Spectre du son $la_2$ joué par un harmonica.

Pour le $la_3$ **(Fig. 5** et **Fig. 6)**, la fréquence du premier pic est de $4{,}4.10^{2}$ Hz. Pour le $la_2$ **(Fig. 7** et **Fig. 8)**, elle vaut $2{,}2.10^{2}$ Hz. Dans les deux cas, elle est égale à la fréquence du son, estimée dans la première partie : c'est la fréquence fondamentale.

**e.** Pour chaque son, la fréquence du pic numéro $n$ est $f_n = nf_1$ où $f_1$ est la fréquence fondamentale.

**f.**

| | Hauteur du son | Timbre du son |
|---|---|---|
| Signal temporel | Fréquence $f$ associée à la période $T$ du signal temporel | Forme du signal temporel |
| Spectre en fréquence | Valeur de la fréquence du premier pic | Nombre de pics et amplitudes relatives des pics |

***Commentaires***

• Pour la question **a.** les signaux présentés sont issus de mesures réelles. Afin d'obtenir de beaux signaux et spectres, on peut utiliser les paramètres d'acquisition suivants :

– durée totale d'acquisition : 100 ms,

– fréquence d'échantillonnage : 5 mesures par milliseconde soit 5 kHz,

– nombre de mesures à réaliser sur la durée totale d'acquisition : 500,

– déclenchement de la mesure sur front croissant.

• Pour la question **b.** la hauteur attendue pour le $la_3$ est de 440 Hz. Les incertitudes expérimentales expliquent la différence obtenue avec la valeur expérimentale. Pour le $la_2$, la valeur expérimentale est conforme à la valeur attendue.

• Pour la question **f.** le timbre d'un son dépend de l'importance des harmoniques et de leur évolution lors de l'attaque de la note et de son extinction.

# Exercices

## Applications

### 1 Célérité de la houle

**a.** La distance $d$ est la distance minimale pour laquelle deux points de la surface de l'eau vibrent en phase : c'est donc la longueur d'onde $\lambda = 51$ m.

**b.** La célérité $v$ vaut $v = \dfrac{\lambda}{T} = \dfrac{51}{9{,}1} = 5{,}6$ m.s$^{-1}$.

**c.** $t = 20$ s n'est pas un multiple de la période $T$. Les deux bateaux ne seront pas au sommet d'une vague à $t = 20$ s.

### 2 Vagues sur la mer

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

### 3 Cuve à ondes

**a.** La période $T$ vaut $T = \dfrac{1}{f} = 3{,}7.10^{-2}$ s.

En utilisant la toise, la longueur d'onde vaut :
$\lambda = 0{,}92$ cm.

**b.** L'image de la surface de l'eau à la date $t + T$ est la même que celle de la date $t$ car l'onde parcourt une longueur d'onde (distance entre deux rides blanches) pendant une période $T$.

**c.** La célérité $v$ de l'onde vaut :
$v = \lambda f = 0{,}92.10^{-2} \times 27 = 0{,}25$ m.s$^{-1}$.

### 4 Medical ultrasound

**a.** Les sons audibles par un être humain ont une fréquence comprise entre 20 Hz et 20 kHz. Ici, la fréquence de 5,0 MHz est bien plus élevée : c'est un ultrason, inaudible pour le fœtus.

**b.** La longueur d'onde vaut :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1{,}5.10^3}{5{,}0.10^6} = 3{,}0.10^{-4} \text{ m.}$$

**c.** Si les ultrasons se propagent dans l'air, seul le milieu de propagation change. La période $T$ et donc la fréquence $f$, imposées par la source, restent inchangées. Par contre, la célérité $v$ dépend de milieu de propagation. Ainsi, la célérité $v$ sera modifiée. La longueur d'onde s'exprime par $\lambda = vT$. La période $T$ n'est pas modifiée mais la célérité $v$ l'est.
Donc la longueur d'onde $\lambda$ est également modifiée.

### 5 Diode laser

**a.** $\lambda_B = 405$ nm appartient à l'intervalle [400 nm ; 800 nm] donc cette lumière est visible.

**b.** La période est $T_B = \dfrac{\lambda}{v} = \dfrac{405.10^{-9}}{3{,}0.10^8} = 1{,}4.10^{-15}$ s et la fréquence correspondante est :

$$f_B = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{1{,}4.10^{-15}} = 7{,}1.10^{14} \text{ Hz.}$$

**c.** La longueur d'onde de cette radiation est : $\lambda_R = vT_R = 3{,}0.10^8 \times 2{,}6.10^{-15} = 7{,}8.10^{-7}$ m.
Cette radiation est visible.

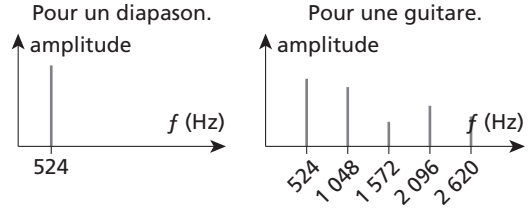
### 6 Analyse de spectres en fréquence

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

### 7 Les paramètres varient

**a.** La fréquence fondamentale du $do_4$ est :
$f(do_4) = 2 \times f(do_3) = 2 \times 262 = 524$ Hz.

**b.** Pour le diapason (son pur), le spectre présente un seul pic à 524 Hz.
Pour la guitare (son complexe), il s'y trouve plusieurs pics d'amplitude différente, de fréquences $f_n = n \times 524$ Hz (avec $n$ un entier naturel).




**c.** Le signal temporel associé au diapason (son pur) est sinusoïdal.

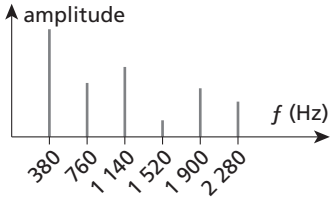
### 8 Analyse d'un signal temporel

**a.** On mesure $10T = 2{,}6.10^{-2}$ s.

Donc la période est $T = \dfrac{2{,}6.10^{-2}}{10} = 2{,}6.10^{-3}$ s

et la fréquence est $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{2{,}6.10^{-3}} = 3{,}8.10^{2}$ Hz.

**b.** Le son est complexe donc il y a plusieurs pics d'amplitudes différentes, de fréquences $f_n = n \times 380$ Hz (avec $n$ un entier naturel).




**c.** La période $T$ et la fréquence fondamentale $f$ ne seraient pas modifiées (même hauteur) mais la forme du signal temporel le serait (timbre différent).

### 9 Deux saxophones plutôt qu'un

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

### 10 Milieux industriels

**a.** Pour $L_1 = 86$ dB, l'intensité sonore vaut :

$I_1 = 10^{-12} \times 10^{\frac{86}{10}} = 4{,}0.10^{-4}$ W.m$^{-2}$.

Et pour $L_2 = 89$ dB, l'intensité sonore vaut :

$I_2 = 10^{-12} \times 10^{\frac{89}{10}} = 7{,}9.10^{-4}$ W.m$^{-2}$.

**b.** L'intensité totale est $I = I_1 + I_2$

$= 4{,}0.10^{-4} + 7{,}9.10^{-4} = 1{,}2.10^{-3}$ W.m$^{-2}$.

Le niveau sonore associé est :

$L = 10\log\dfrac{I}{I_0} = 10\log\dfrac{1{,}2.10^{-3}}{10^{-12}} = 91$ dB.

**c.** Durant huit heures de travail, si toutes les machines sont en marche, le niveau sonore (91 dB) est supérieur à la limite admise (90 dB). Jérémy risque un problème auditif.

## Entraînement

### 11 Onde sinusoïdale le long d'une corde

**a.** Comme $3T = 5{,}1$ s, la période $T$ vaut :

$T = \dfrac{5{,}1}{3} = 1{,}7$ s. La fréquence vaut $f = \dfrac{1}{1{,}7} = 0{,}59$ Hz.

**b.** La longueur d'onde $\lambda$ vaut :

$\lambda = vT = 1{,}2 \times 1{,}7 = 2{,}0$ m.

**c.** Un point situé à 4,0 m du point O est situé à deux longueurs d'onde de O. Ce point vibre donc en phase avec le point O.

**d.** Un point situé à 5,0 m du point O n'est pas situé à un nombre entier de longueurs d'onde du point O. Donc, il ne vibre pas en phase avec le point O. Il vibre en opposition de phase avec le point O.

### 12 Cuve à ondes

**a.** À l'aide de la toise, on détermine que la longueur d'onde vaut $\lambda = 1{,}1$ cm.

**b.** À la date $t + \dfrac{T}{2}$, l'onde a parcouru une demi-longueur d'onde par rapport à la date $t$.

Donc, l'image de la surface de l'eau est opposée à celle de la figure de l'énoncé : les rides blanches sont transformées en rides noires et inversement.

À la date $t + T$, l'image est la même que celle de l'énoncé, l'onde ayant parcouru une longueur d'onde entre les deux images.

**c.** La célérité $v$ de l'onde vaut :

$v = \lambda f = 1{,}1.10^{-2} \times 20 = 0{,}22$ m.s$^{-1}$.

**d.** $v < v'$ donc la célérité de l'onde dépend de la fréquence imposée par la source. L'eau est un milieu dispersif pour cette onde.

### 13 Ondes dans l'eau

**a.** La goutte n° 1 correspond à la date $t = 0$.

La soixantième goutte correspond à $t = 30$ s.

La durée écoulée $\Delta t$ entre ces deux dates correspond donc à 59 périodes.

Donc, $\Delta t = 59T$. Ainsi, $T = \dfrac{\Delta t}{59} = \dfrac{30}{59} = 0{,}51$ s.

La fréquence $f$ vaut $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{1}{0{,}51} = 2{,}0$ Hz.

**b.** 30 cm sur le schéma correspondent à 6 longueurs d'onde donc $\lambda = \dfrac{30}{6} = 5{,}0$ cm.

**c.** La célérité $v$ vaut :

$v = \dfrac{\lambda}{T} = \dfrac{5{,}0.10^{-2}}{0{,}51} = 9{,}8.10^{-2}$ m.s$^{-1}$.

### 14 Lame vibrante

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

## Approfondissement

### 15 Lumière

**a.** La période $T$ vaut :

$$T = \frac{\lambda}{c} = \frac{10{,}6.10^{-6}}{3{,}0.10^{8}} = 3{,}5.10^{-14}\text{ s.}$$

La fréquence $f$ vaut :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{3{,}5.10^{-14}} = 2{,}9.10^{13}\text{ Hz.}$$

**b.** La période $T$ et donc la fréquence $f$ ne sont pas modifiées (grandeur imposées par la source et ne dépendant pas du milieu de propagation). L'indice optique de l'eau est supérieur à 1 donc la célérité $v$ de l'onde électromagnétique dans l'eau est plus faible que sa célérité $c$ dans le vide. Donc la longueur d'onde $\lambda = vT$ est modifiée : elle diminue également (car $T$ est identique et $v$ est plus faible).

**c.** La célérité $v$ dans l'eau vaut :

$v = \dfrac{c}{n} = \dfrac{3{,}0.10^8}{1{,}3} = 2{,}3.10^8$ m.s$^{-1}$.

La longueur d'onde $\lambda$ vaut :

$\lambda = vT = 2{,}3.10^8 \times 3{,}5.10^{-14} = 8{,}1.10^{-6}$ m = 8,1 µm.

## 16 Atténuation de l'intensité sonore

**a.** La puissance $P$ émise par la source se répartit uniformément sur une demi-sphère de rayon $r$. Sur chaque point de cette demi-sphère, l'intensité sonore $I$ est la même et vaut $I = \dfrac{P}{2\pi r^2}$.

Or, $L = 10\log\left(\dfrac{I}{I_0}\right) = 10\log\left(\dfrac{P}{2\pi r^2 \times I_0}\right)$.

Pour $r$ = 0,25 m :

$L = 10\log\left(\dfrac{P}{2\pi(0{,}25)^2 \times I_0}\right)$.

Et pour $r$ = 0,5 m :

$$L' = 10\log\left(\frac{P}{2\pi(0{,}50)^2 \times I_0}\right)$$

$$= 10\log\left(\frac{P}{2\pi(2\times 0{,}25)^2 \times I_0}\right)$$

$$= 10\log\left(\frac{P}{2\pi(0{,}25)^2 \times I_0}\right) - 10(\log 4)$$

Donc $L' = L - 10\log 4 = L - 6{,}0 = 56 - 6{,}0 = 50$ dB.

**b.** Quand la distance $r$ est doublée, l'intensité sonore est divisée par 4.

Pour un rayon $r$, le niveau sonore vaut :

$$L = 10\log\frac{I}{I_0}$$

Pour un rayon doublé $2r$, il vaut donc $L' = 10\log\left(\dfrac{\frac{I}{4}}{I_0}\right)$

soit $L' = 10\log\left(\dfrac{I}{4I_0}\right) = 10\log\left(\dfrac{I}{I_0}\right) - 10\log 4$

$= L - 6{,}0$ dB.

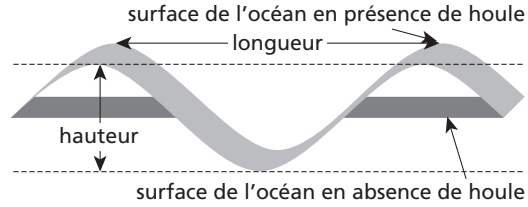
Le niveau sonore est donc atténué de 6,0 dB à chaque fois que le rayon $r$ est doublé.

**c.** Le seuil d'audibilité à la fréquence choisie vaut 38 dB. Or, 56 – 38 = 18 dB = 6,0 × 3 dB.

Le rayon doit donc être successivement doublé trois fois d'affilé pour que l'oreille n'entende plus le son. Ainsi, il doit être multiplié par $2^3 = 8$. L'oreille n'entend plus le son pour une distance $r = 0{,}25 \times 8 = 2{,}0$ m.

## 17 La houle

**1.a.** On obtient la figure suivante.




**b.** Le terme longueur représente la longueur d'onde, distance minimale séparant deux points du milieu qui vibrent en phase.

**c.** La période $T$ permet de caractériser une onde périodique. C'est la durée minimale séparant deux perturbations identiques en un point du milieu.

**2.a.** La cambrure vaut $C_a = \dfrac{h}{L}$.

**b.** $C_a = \dfrac{h}{L} = \dfrac{1}{7}$ soit $L = 7h$. Les valeurs de $L$ s'en déduisent pour les degrés 6, 8, 10 et 12 de l'échelle de Beaufort.

**c.** La longueur d'onde vérifie $L = vT$.

**d.** La période s'écrit $T = \dfrac{1}{f}$ d'où la relation $L = \dfrac{v}{f}$ ou $v = Lf$.

**e.** En utilisant la relation $v = \dfrac{L}{T}$, les valeurs de la célérité pour les degrés 7 et 10 de l'échelle s'en déduisent. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

| Échelle de Beaufort | 6 | 7 | 8 | 10 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|
| Hauteur $h$ (m) | 3,00 | 4,00 | 5,50 | 9,00 | 14,0 |
| Longueur $L$ (m) | 21,0 | 28,0 | 38,5 | 63,0 | 98,0 |
| Période $T$ (S) | 2,60 | 3,00 | 3,50 | 4,50 | 5,60 |
| Célérité $v$ (m.s$^{-1}$) | 8,08 | 9,33 | 11,0 | 14,0 | 17,5 |

**3.a.** Une droite est obtenue : $v^2$ est proportionnel à $L$. Cela s'écrit $v^2 = kL$ où $k$ est le coefficient directeur de la droite.

**b.** Le calcul du coefficient directeur $k$ donne $k = 3{,}1$ m.s$^{-2}$.

**c.** Comme $v = Lf$ et $L = \dfrac{v^2}{k}$, on en déduit $v = \dfrac{v^2 f}{k}$ ou encore $v = \dfrac{k}{f}$.

## 18 Concert de violons

**1.a.** L'enregistrement ① fait apparaître un signal périodique, non sinusoïdal, propre d'un son complexe : il a été enregistré à l'aide du violon.
L'enregistrement ② présente un signal sinusoïdal associé à un son pur : c'est celui du diapason.

**b.** Les deux signaux possèdent la même période mais pas la même forme. Le timbre des deux sons est donc différent (mais la hauteur est la même).

**c.** La fréquence $f_1$ est la fréquence fondamentale.

**2.a.** Le niveau sonore $L_1$ est relié à l'intensité sonore $I_1$ par l'expression :

$$L_1 = 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \text{ avec } I_0 = 1{,}0.10^{-12} \text{ W.m}^{-2}.$$

**b.** Pour calculer le niveau sonore correspondant au seuil d'audibilité, il faut utiliser la valeur de l'intensité sonore associée, soit $I_1 = I_0$.

Donc $L_1 = 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 10 \log 1 = 0$ dB.

**c.** L'intensité sonore produite par un seul violon est :

$$I_1 = I_0 \times 10^{\frac{L_1}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{70}{10}} = 1{,}0.10^{-5} \text{ W.m}^{-2}.$$

Pour le groupe musical composé de 5 violons identiques, l'intensité sonore vaut :
$I = 5I_1 = 5{,}0.10^{-5}$ W.m$^{-2}$.
Le niveau sonore produit par le groupe est donc :

$$L = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = 10\log\left(\frac{5I_1}{I_0}\right) = 10\log 5 + 10\log\left(\frac{I_1}{I_0}\right) = 77 \text{ dB}.$$

**d.** L'intensité sonore est égale à $I = nI_1$ où $n$ est le nombre de violons nécessaires à l'obtention de l'intensité sonore $I$ et où $I_1$ est l'intensité sonore produite par un seul violon. Donc $n = \frac{I}{I_1} = \frac{1{,}0.10^{-1}}{1{,}0.10^{-5}} = 1{,}0.10^4$ violons ! Un groupe musical ne peut pas être constitué d'autant de violons.

## 19 Célérité d'une onde sonore

**1.a.** La lecture de quatre périodes donne $4T = 9{,}2$ ms.

Donc, la période vaut $T = \frac{9{,}2}{4} = 2{,}3$ ms.

La fréquence $f$ associée vaut :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2{,}3.10^{-3}} = 4{,}3.10^2 \text{ Hz}$$

(c'est certainement en réalité un $la_3$ de 440 Hz).

**b.** La longueur d'onde $\lambda$ d'une onde progressive périodique est la distance minimale séparant deux points du milieu qui vibrent en phase. La distance D est égale à cinq longueurs d'onde.

Donc $\lambda = \frac{D}{5} = \frac{3{,}86}{5} = 0{,}77$ m.

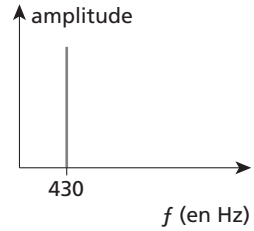
**c.** En comptant plusieurs positions pour lesquelles les courbes sont en phase, les incertitudes sont plus petites.

**d.** La célérité v de l'onde vaut :

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{0{,}77}{2{,}3.10^{-3}} = 3{,}3.10^2 \text{ m.s}^{-1}.$$

**e.** La célérité est identique à celle de la question précédente, aux erreurs expérimentales près. Elle ne dépend donc pas de la fréquence de l'onde sonore. L'air n'est pas un milieu dispersif pour les ondes sonores.

**2.a.** Le signal temporel associé au diapason est sinusoïdal donc il produit un son pur.




**b.** Le spectre en fréquence ne fait apparaître qu'un seul pic (fréquence fondamentale).

**c.** La fréquence fondamentale est la même pour les deux instruments : la hauteur n'est pas modifiée. Seul le timbre diffère entre les deux sons.

**d.** Le timbre n'a pas d'influence sur la célérité du son dans l'air (l'air n'étant pas un milieu dispersif).

# Rédiger une synthèse de documents

## 20 Des lasers pour détatouer

*Analyse de la question*

La question demande de choisir parmi les lasers proposés dans le tableau de l'énoncé. Il s'agit donc d'abord de choisir le type de laser (à impulsion ou à mode continu) en utilisant le texte du document 2. Puis, il faut faire le lien entre la longueur d'onde du laser utilisé pour détatouer une personne et la couleur du tatouage en utilisant le texte du document 2 et les notions de Première S sur les couleurs complémentaires. Il conviendra d'utiliser la **figure 7** du cours pour associer une couleur à la longueur d'onde du laser.

*Piste de réponses et mots-clés*

**1.** D'abord, il faut choisir le **mode du laser**. Ceux utilisés par les dermatologues pour effacer les tatouages sont de type **pulsé** (document 2). Les lasers à mode **continu** sont donc à exclure pour l'utilisation souhaitée ici. L'**énergie** $E$ libérée par le laser lors d'un pulse est reliée à la **puissance** $P$ du faisceau par l'expression $E = P\Delta t$ où $\Delta t$ est la durée du **pulse**. Pour l'utilisation requise, $\Delta t$ est de l'ordre de **quelques nanosecondes**. La **puissance** $P$ est de l'ordre de 100 MW. Ainsi, l'**énergie** $E$ est de l'ordre de $100.10^6 \times 10^{-9} = 0{,}1$ J pour $\Delta t = 1$ ns. Pour $\Delta t = 10$ ns, $E$ vaut 1 J. C'est bien l'ordre de grandeur des **énergies** cédées par **pulse** proposées dans le tableau de l'énoncé.

**2.** Cependant, ce calcul ne permet pas de choisir parmi les différents lasers pulsés. Il faut donc étudier la **longueur d'onde** du laser, fonction de la couleur du tatouage à effacer. La **couleur** du laser doit être **complémentaire** de celle du tatouage à effacer, ici verte (document 2). La **couleur complémentaire** du vert est le rouge (voir tableau des couleurs complémentaires du livre de première S). Parmi les trois **longueurs d'onde** proposées par les lasers pulsés (voir le rabat de couverture du manuel de l'élève), seule 695 nm se rapproche de la **couleur** rouge (figure 7 du cours) : 532 nm est proche du vert et 1 064 nm est dans l'infrarouge.

Le laser à choisir est donc le laser rubis à impulsion de 10 ns, de longueur d'onde 695 nm.

Chapitre 3

# Propriétés des ondes

## Introduction au chapitre (p. 76)

Ce chapitre vient à la suite des chapitres 1 et 2, dans lesquels la notion d'onde a été introduite, ainsi que les grandeurs qui les caractérisent : fréquence, période et longueur d'onde.

Il s'agit ici de présenter les propriétés des ondes progressives. Trois propriétés sont abordées : les interférences, la diffraction et l'effet Doppler. Ces propriétés étant valables pour tous les types d'ondes, elles sont présentées à chaque fois dans les activités, le cours et les exercices pour plusieurs ondes parmi les ondes mécaniques (vagues…), acoustiques (sonores et ultrasonores) et lumineuses.

Les activités 1 et 2 sont volontairement illustrées d'un grand nombre de photographies d'expériences de diffraction et d'interférences, dans le but d'aider le professeur à illustrer ces propriétés si ces expériences ne peuvent pas toutes être réalisées en classe. Ce sont, avant tout, des activités de découverte.

L'activité 3 est davantage ciblée sur un seul type d'onde, les ondes lumineuses, et appliquée spécifiquement à l'astrophysique. Ceci est une continuité des différentes applications à l'astrophysique vues en classe de Seconde (observation des étoiles) et en classe de Première S (sources de lumière, loi de Wien).

Les deux dernières activités sont expérimentales. L'activité 4 sur la diffraction et les interférences des ondes lumineuses est assez classique, alors que l'activité 5 sur la mesure d'une vitesse par effet Doppler est plus originale. Cette dernière est aussi une occasion d'utiliser un logiciel d'acquisition de données.

Le cours est, lui aussi, assez descriptif, puisqu'aucune démonstration ne peut être faite sur le phénomène de diffraction (le principe de Huygens-Fresnel n'est pas au programme). Seule la démonstration de l'écart de fréquence Doppler est faite, car elle a l'avantage de bien faire comprendre pourquoi la fréquence change.

Enfin, les exercices sont eux aussi très variés d'une part en portant sur tous les types d'ondes abordés dans les activités et le cours, et d'autre part en ayant pour certains une démarche expérimentale (exercices 14, 19, 20).

## Activités

### 1 Diffraction des ondes (p. 78)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

#### *Objectif*

L'objectif de cette activité est de faire découvrir le phénomène de diffraction sur plusieurs types d'ondes (les ondes à la surface de l'eau et les ondes lumineuses).

Les expériences réalisées ici peuvent facilement être reproduites en classe.

Le but est de caractériser la diffraction, en jouant sur plusieurs paramètres (la longueur d'onde, la taille de l'obstacle) pour aboutir à une condition permettant de ne pas négliger la diffraction (taille de l'obstacle non grande devant la longueur d'onde).

#### *Correspondance avec le programme*

- Savoir que l'importance du phénomène de diffraction est liée au rapport de la longueur d'onde aux dimensions de l'ouverture ou de l'obstacle.
- Connaître et exploiter la relation $\theta = \frac{\lambda}{a}$.
- Identifier les situations physiques où il est pertinent de prendre en compte le phénomène de diffraction

#### *Corrigé*

**a.** Sur les **figures 1** et **2** du manuel de l'élève, la mesure de la longueur d'onde montre qu'elle est identique de part et d'autre de la fente : trois longueurs d'onde correspondent à 15 mm sur la figure. Seule la direction de propagation change. Elles illustrent donc bien le phénomène de diffraction. Les **figures 4, 5** et **6** montrent également la modification de la direction de propagation de l'onde.

**b.** On observe que :
• pour les deux types d'onde, la direction de propagation est perpendiculaire à la fente avant celle-ci, alors qu'elle ne l'est plus après. Les directions de propagation sont multiples après l'ouverture,
• plus $a$ est faible, plus l'onde peut être diffractée d'un angle élevé (**figures 1** et **2** pour les ondes mécaniques, et **figures 4** et **6** pour les ondes lumineuses),
• si la longueur d'onde diminue, l'angle de diffraction diminue aussi **(figures 4** et **5).**

**c.** D'après la **figure 3**, l'angle s'exprime, en utilisant l'approximation des petits angles : $\theta = \frac{d}{2D}$.
En mesurant $d = 10$ mm sur la **figure 5**,
$\theta = \frac{10.10^{-3}}{2 \times 3} = 1{,}7.10^{-3}$ rad.
Comme $\theta = \frac{\lambda}{a}$, la longueur d'onde est :
$\lambda = \theta a = 1{,}7.10^{-3} \times 280.10^{-6} = 4{,}7.10^{-7}$ m (470 nm).

**d.** Sur la **figure 6**, $d = 35$ mm, donc :
$\theta = \frac{d}{2D} = \frac{35.10^{-3}}{2 \times 3} = 5{,}8.10^{-3}$ rad.
La largeur de la fente est donc :
$a = \frac{\lambda}{\theta} = \frac{650.10^{-9}}{5{,}8.10^{-3}} = 1{,}1.10^{-4}$ m = 0,11 mm

**e.** Sur la **figure 1**, 2,3 cm correspondent à 5,0 cm en réalité, donc l'échelle est $\frac{2{,}3}{5{,}0} = 4{,}6.10^{-1}$.
En mesurant trois longueurs d'onde à 1,5 cm, la longueur d'onde de l'onde utilisée pour la **figure 1** comme pour la **figure 2** est :

$$\lambda = \frac{1}{4{,}6.10^{-1}} \times \frac{1{,}5}{3} = 1{,}1 \text{ cm.}$$

Sur la **figure 1** : $\frac{\lambda}{a} = \frac{1{,}1}{5{,}0} = 0{,}22$.
Sur la **figure 2** : $\frac{\lambda}{a} = \frac{1{,}1}{1{,}0} = 1{,}1$.
Le rapport $\frac{\lambda}{a}$ est faible pour l'expérience de la **figure 1**, alors qu'il est beaucoup plus grand pour l'expérience de la **figure 2**. La diffraction est donc négligeable si $\frac{\lambda}{a}$ est petit, c'est-à-dire si la largeur de la fente est très grande devant la longueur d'onde. C'est le cas des ondes lumineuses traversant les obstacles de la vie quotidienne (fenêtre…).

### *Commentaires*

• La diffraction des ondes est une propriété que l'on peut négliger si la taille de l'obstacle est très grande devant la longueur d'onde.
Dans le cas de la lumière, on parle de l'approximation de l'optique géométrique, pour laquelle $\lambda$ tend vers zéro, si bien que tous les obstacles sont de tailles bien supérieures. La propagation de la lumière étudiée en Seconde se fait implicitement dans le cadre de cette approximation. En réalité, la **figure 1** montre bien de la diffraction par les bords d'écran. Néanmoins, la modification du front d'onde face à l'ouverture reste assez peu sensible.
• Cette activité gagne à être faite avant le cours, pour « découvrir » cette propriété des ondes et non uniquement pour illustrer le cours. La diffraction est, en effet, *a priori* étonnante, puisqu'elle contredit le fait que la lumière se propage en ligne droite dans un milieu homogène, d'où une mise en évidence expérimentale avant de donner les résultats théoriques. Une explication qualitative de la diffraction peut être donnée aux élèves à l'aide du principe d'Huygens-Fresnel dans le cas d'une onde plane à la surface de l'eau à la traversée d'une ouverture diffractante : chaque point de l'ouverture diffractante recevant une onde plane se comporte comme une source secondaire réémettant une onde circulaire. Lorsque l'ouverture est grande, la superposition de ces ondes circulaires redonne une onde plane, alors que dans le cas d'une ouverture infiniment fine, seule une onde circulaire peut être transmise.

## 2 Interférences (p. 79)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

### *Objectif*

Comme la précédente, cette activité est une découverte d'un phénomène : celui des interférences. Ici encore, deux types d'ondes sont présentés. Notons que les ondes sonores sont moins simples à présenter car le matériel nécessaire (émetteur, capteur, oscilloscope ou interface de mesure) est moins facile à mettre en œuvre rapidement en classe. Contrairement aux interférences des ondes lumineuses ou mécaniques, les interférences sonores sont difficiles à « voir ».
Il est possible de ne réaliser qu'une seule expérience en classe, pour ensuite demander aux élèves de répondre aux mêmes questions sur un autre type d'onde, grâce aux photographies d'expériences présentes dans le manuel.
Dans le cas des ondes lumineuses, seules les franges sont visibles, alors que les ondes obtenues dans une cuve à ondes permettent de distinguer les deux ondes qui se superposent, et donc d'identifier les crêtes et les creux de vibration.

### *Correspondance avec le programme*

Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.

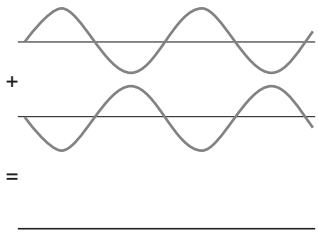
### *Corrigé*

**a.** Comme 8,0 cm correspondent à 5,3 cm sur la figure, l'échelle est $\frac{5,3}{8,0} = 0,66$.

En mesurant la distance entre quatre longueurs d'onde (en faisant bien passer la règle par la source), celle-ci vaut 3,0 cm sur la figure, donc : $\lambda = \frac{2,7}{4} \times \frac{1}{0,66} = 1,0$ cm.

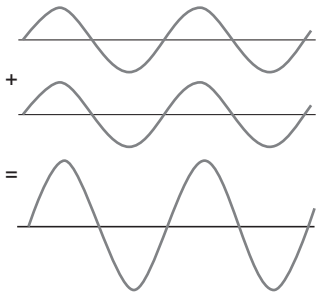
**b.** Le point $M_1$ est sur un creux de l'onde créée par $S_1$, donc il est en opposition de phase avec $S_1$, car $S_1$ est sur une crête. Il est également sur une crête de l'onde créée par $S_2$, donc $M_1$ est en phase avec $S_2$ puisque $S_2$ se trouve également sur une crête.

**c.** Les deux ondes en $M_1$ sont alors en opposition de phase, et comme elles ont même amplitude elles s'annulent.




**d.** $M_2$ est sur une crête de chacune des ondes créées par $S_1$ et $S_2$, qui sont elles-mêmes sur une crête, donc $M_2$ est en phase avec $S_1$ et $S_2$.

Les deux ondes sont alors en phase et l'amplitude résultant de leur superposition est maximale.




**e.** Dans le cas général, il peut y avoir plusieurs positions du point M pour lesquelles les ondes sont en phase ou en opposition de phase, donc il peut y avoir plusieurs franges.

**f.** Pour un même point M, la différence de trajet est la même, mais si la longueur d'onde change le déphasage change également.

Ainsi, pour différentes longueurs d'ondes, les ondes seront en phase en des points différents, d'où l'observation des couleurs en des positions différentes.

### *Commentaires*

Ici, on fait montrer aux élèves que les deux ondes sont en phase ou en opposition de phase en un point par rapport à la source. Or, de manière plus générale, seul le déphasage des deux ondes entre elles a de l'importance, indépendamment du déphasage par rapport à la source.

Par exemple, si les deux sources de la cuve à ondes ne vibrent pas en phase mais ont exactement la même fréquence, des interférences seront observées si le déphasage entre les deux sources est indépendant du temps. La position des franges s'en trouvera modifiée mais pas leur nombre.

Pour les ondes lumineuses, les deux sources, constituées des deux fentes d'Young, ont très peu de chance d'être en phase (il faudrait que la source primaire soit exactement sur la médiatrice, avec une précision bien inférieure à la longueur d'onde). C'est la raison pour laquelle il faut utiliser une seule source primaire, grâce à laquelle deux sources secondaires cohérentes (c'est-à-dire déphasées avec un déphasage constant) sont obtenues et peuvent donc interférer.

## 3 Effet Doppler et astrophysique (p. 80)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

### *Objectif*

L'objectif de cette activité est d'utiliser l'effet Doppler comme un moyen d'investigation en astrophysique. Comme le décalage en fréquence permet de connaître la vitesse d'une source, le spectre de la lumière émise par un limbe du Soleil est présenté, afin de mesurer ce décalage.

Cette activité n'est qu'une application à un cas particulier, et peut faire l'objet de l'utilisation d'un logiciel de traitement d'image pour observer avec plus de précision le décalage dans le spectre.

### *Correspondance avec le programme*

- Exploiter l'expression du décalage Doppler de la fréquence dans le cas des faibles vitesses.
- Utiliser des données spectrales et un logiciel de traitement d'images pour illustrer l'utilisation de l'effet Doppler comme moyen d'investigation en astrophysique.

### *Corrigé*

**a.** Une raie d'absorption due à l'atmosphère terrestre n'est pas décalée dans les deux spectres, puisque l'atmosphère terrestre n'est pas en mouvement par rapport à l'observateur.

**b.** *Shift* signifie « décalage ». Le décalage vers le rouge signifie un décalage vers les faibles fréquences, donc une diminution de la fréquence perçue. Elle augmente s'il y a décalage vers le bleu.

**c.** Sur la **figure 12**, 138 mm correspondent à 2 nm, donc 1 mm correspond à $1{,}4.10^{-2}$ nm. Le décalage des raies étant de l'ordre de 1 mm sur la figure, cela correspond à $1{,}4.10^{-2}$ nm.

Le lien entre la longueur d'onde et la fréquence étant $\lambda = \dfrac{c}{f}$ alors $\dfrac{\delta f}{f} = \dfrac{\delta \lambda}{\lambda}$

donc $\dfrac{\delta f}{f} = \dfrac{1{,}4.10^{-2}}{657} = 2{,}2.10^{-5}$.

La vitesse du limbe est du Soleil est :

$v = c\dfrac{\delta f}{f} = 3{,}00.10^{8} \times 2{,}2.10^{-5} = 6{,}6.10^{3}$ m.s$^{-1}$.

**d.** Le logiciel permettrait d'obtenir deux courbes décalées. Cette méthode permet une mesure plus précise en zoomant sur l'image obtenue.

### *Commentaires*

• La valeur calculée ici n'est qu'une grosse approximation, car :
  – le décalage est très faible comparé à la longueur d'onde, d'où une piètre précision,
  – la vitesse du limbe est du Soleil n'est pas constante, dus aux mouvements combinés de rotation du Soleil sur lui-même et sur son orbite,
  – il y a un effet Doppler longitudinal et un effet Doppler transversal.

• L'effet Doppler étudié ici est un effet Doppler non relativiste, donc les vitesses des objets doivent rester faibles devant la vitesse de la lumière. Dans le cas contraire, la correction relativiste est comparable au décalage Doppler classique, donc ne pas la considérer serait une erreur (voir le chapitre 10).

• L'effet Doppler permet de mesurer d'autres phénomènes en astrophysique, notamment l'expansion de l'univers (caractérisé par la loi de Hubble : les galaxies s'éloignent d'un observateur à une vitesse proportionnelle à leurs distances). Ces mesures sont effectuées par les astrophysiciens dans le cadre de la Physique relativiste.

• Les données sur les décalages de spectres sont difficiles à trouver.

• L'activité peut être prolongée en demandant aux élèves de faire des recherches sur d'autres mesures qui ont été effectuées par effet Doppler. Il est aussi possible de faire appel au programme de Seconde et Première, en demandant aux élèves de recenser toutes les informations que l'on peut finalement déduire de l'observation d'un spectre.

## 4 Diffraction et interférences lumineuses (p. 81)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale présente plusieurs objectifs :

• mesurer la dépendance de l'angle de diffraction en fonction de la largeur d'une fente,

• mesurer la largeur ou l'épaisseur d'un petit objet (ici un cheveu) grâce au phénomène de diffraction,

• mesurer la dépendance de l'interfrange de la figure d'interférences obtenue avec des fentes d'Young en fonction de la distance entre les franges, la position de l'écran et la longueur d'onde.

Les mesures demandées, notamment pour les interférences, peuvent prendre beaucoup de temps : il est possible de demander à plusieurs groupes d'élèves d'étudier séparément la dépendance à un seul paramètre.

### *Correspondance avec le programme*

• Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier ou utiliser le phénomène de diffraction dans le cas des ondes lumineuses.

• Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses.

### *Liste de matériel*

• Un banc d'optique.

• Un jeu de fentes diffractantes de largeurs différentes.

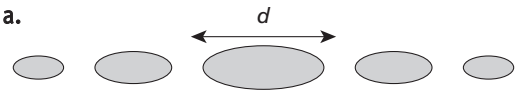
• Un jeu de fils fins d'épaisseurs différentes.

• Une source laser (si possible deux de longueurs d'onde différentes).

• Un jeu de fentes d'Young.

• Un écran blanc, éventuellement recouvert de papier millimétré.

**a.**

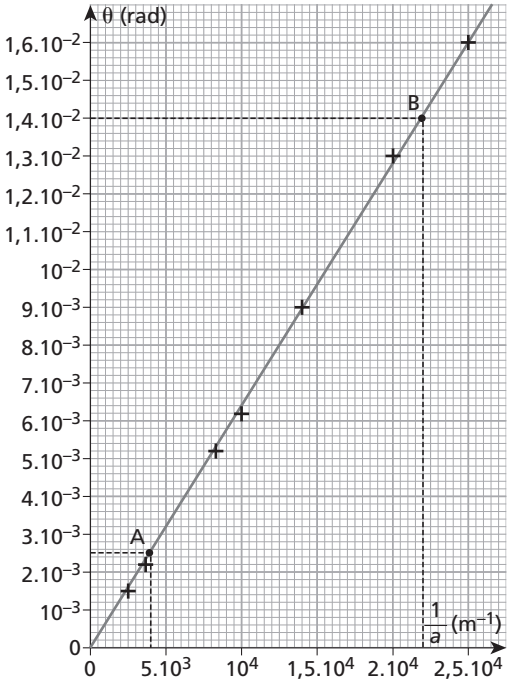



**b.** Calcul des valeurs de l'angle $\theta$ avec $\tan\theta = \dfrac{d}{2D}$.

Par exemple avec les fentes fournies par Jeulin :

| $a$ (mm) | $d$ (mm) | $\theta$ (rad) | $\frac{1}{a}$ ($m^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 0,040 | 63 | $1{,}6.10^{-2}$ | $2{,}5.10^{4}$ |
| 0,050 | 51 | $1{,}3.10^{-2}$ | $2{,}0.10^{4}$ |
| 0,070 | 36 | $9{,}0.10^{-3}$ | $1{,}4.10^{4}$ |
| 0,10 | 25 | $6{,}2.10^{-3}$ | $1{,}0.10^{4}$ |
| 0,12 | 21 | $5{,}2.10^{-3}$ | $8{,}3.10^{3}$ |
| 0,28 | 9 | $2{,}2.10^{-3}$ | $3{,}6.10^{3}$ |
| 0,40 | 6 | $1{,}5.10^{-3}$ | $2{,}5.10^{3}$ |

**c.** La courbe est une droite passant par l'origine.




**d.** La longueur d'onde est le coefficient directeur de la droite.

Avec l'exemple expérimental ci-dessus, cela donne :

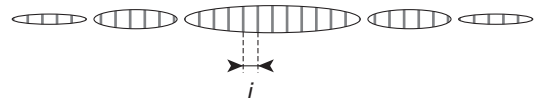
$$\lambda = \frac{(\theta)_B - (\theta)_A}{\left(\frac{1}{a}\right)_B - \left(\frac{1}{a}\right)_A} = \frac{1{,}4.10^{-2} - 2{,}5.10^{-3}}{2{,}2.10^{4} - 4.10^{3}}$$

$= 6{,}4.10^{-7}$ m.

**e.** Un fil ou une fente donnent une tache centrale de même largeur, donc l'angle de diffraction est le même. Il suffit donc de déterminer $\theta$ en réalisant l'expérience avec le cheveu puis d'utiliser la courbe tracée au **c.** pour en déduire l'épaisseur $a$ du cheveu.

Cette épaisseur varie, selon les élèves, entre 0,05 mm et 0,1 mm.

**f.**




**g.** Réaliser plusieurs expériences en faisant varier un seul paramètre à la fois : la distance $D$ à l'écran, la distance $a$ entre les fentes et la longueur d'onde. Éventuellement tracer à chaque fois une droite pour montrer la proportionnalité avec $\lambda$ ou $D$, ou la proportionnalité inverse avec $a$.

Par exemple, en laissant l'écran à $D = 2$ m des fentes d'Young, les interfranges sont, pour une source laser de longueur d'onde $\lambda = 632$ nm :

| $a$ (mm) | 0,2 | 0,3 | 0,5 |
|---|---|---|---|
| $i$ (mm) | 6 | 4 | 2,5 |

***Commentaires***

• Dans les expériences réalisées ici, les franges ne sont pas des « vraies » droites car elles sont comprises dans la figure de diffraction d'une seule fente, donc leur hauteur est très faible.

Pour obtenir de belles droites, il faut que la source soit une fente éclairée sur toute sa hauteur, ce qui peut être obtenu en élargissant le faisceau laser. Chaque point de la fente source peut alors être considéré comme une source primaire, et tous ces points sources donnent la même figure d'interférences, car il n'y a diffraction que dans une direction perpendiculaire aux fentes (et non parallèlement aux fentes).

L'inconvénient d'élargir le faisceau est que l'intensité lumineuse en un point de l'écran sera plus faible pour une même source laser.

• Les interférences lumineuses doivent être traitées après la diffraction, car la figure d'interférences s'observe dans la figure de diffraction d'une fente. Traiter diffraction et interférences sans d'abord montrer uniquement la diffraction paraît beaucoup moins simple pour les élèves.

• Cette activité peut être enrichie et illustrée grâce à l'activité expérimentale 4 p. 527 du chapitre 21 du manuel de l'élève.

• Les mesures sont plus précises en augmentant la distance $D$. Un banc d'optique de très grande taille est appréciable. Il est aussi possible d'observer les interférences sur un mur de la salle, pour encore augmenter $D$.

## 5 Mesure d'une vitesse par effet Doppler (p. 82)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale a pour objectif d'utiliser l'effet Doppler pour mesurer une vitesse.

Pour plus de facilité, le choix a été fait d'utiliser du matériel déjà existant, mais d'autres montages sont réalisables. Signalons par exemple qu'une expérience réalisée avec un émetteur mis en translation (comme dans l'exercice résolu A p. 92 du manuel de l'élève) grâce au chariot d'une imprimante est décrite dans le BUP n° 943 d'avril 2012.

Les mesures sont ici réalisées grâce à un logiciel de traitement de données qui devra donc être correctement utilisé par les élèves, notamment concernant les différents réglages de paramètres, comme la fréquence d'échantillonnage qui doit être la plus grande possible pour gagner en précision.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mesurer une vitesse en utilisant l'effet Doppler.

### *Liste de matériel*

- Un générateur basses fréquences.
- Un haut-parleur.
- Un microphone.
- Un pendule et son support.
- Une interface d'acquisition.
- Des câbles électriques.

### *Corrigé*

**a.** Avec $h = 12$ cm, les mesures suivantes ont été effectuées, pour 20 périodes du signal reçu par le microphone comptées à l'écran :
20 $T_1 = 20{,}054$ ms et 20 $T_2 = 20{,}276$ ms.
Les fréquences correspondantes sont :
$f_1 = 997{,}31$ Hz et $f_2 = 986{,}39$ Hz.
Leur moyenne est $f_0 = 991{,}84$ Hz.

**b.** La fréquence $f_1$ est bien la fréquence perçue par le récepteur lorsque le haut-parleur se rapproche car l'amplitude du signal augmente. La fréquence $f_2$ est donc la fréquence perçue lorsque le haut-parleur s'éloigne puisque l'amplitude diminue. Enfin $f_0$ est la fréquence émise par le haut-parleur.

**c.** Il s'en déduit $v = \dfrac{|f_1 - f_2|}{2f_0} c = 1{,}9$ m.s$^{-1}$

**d.** La valeur théorique avec les données présentes est $v_{th} = 1{,}5$ m.s$^{-1}$. Ces deux valeurs présentent un écart relatif $\left|\dfrac{v - v_{th}}{v_{th}}\right| = 23$ %, qui est très grand : le résultat n'est pas de bonne qualité.

**e.** L'erreur de lecture des durées sur l'axe des abscisses conduit à une incertitude de mesure des durées estimée à $\Delta t = 0{,}02$ ms : environ 10 µs de chaque côté. L'incertitude absolue sur la mesure des périodes est donc $\Delta T = \dfrac{\Delta t}{20} = 1.10^{-6}$ s.

**f.** $\dfrac{\Delta f}{f} = \dfrac{\Delta T}{T}$ donc $\Delta f = f_0 \dfrac{\Delta T}{T_0} = f_0^2 \Delta T$.
Cela donne ici $\Delta f = 1$ Hz.

**g.** L'incertitude relative sur la célérité est :

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{0{,}05.10^2}{3{,}4.10^2} = 1.10^{-2}.$$

L'incertitude sur $f_0$ est $\dfrac{\Delta f}{f_0} = \dfrac{1}{1.10^3} = 1.10^{-3}$ et l'incertitude sur le décalage Doppler est $\dfrac{2\Delta f}{f_1 - f_2} = \dfrac{2 \times 1}{997{,}31 - 986{,}39} = 0{,}2$. La somme de ces incertitudes relatives donne $\dfrac{\Delta v}{v} = 0{,}2$.

La méthode de mesure comporte donc une source d'erreurs importante : le décalage Doppler proprement dit.

**h.** Il est possible d'améliorer cette méthode en réalisant plusieurs mesures en faisant varier la fréquence du générateur, pour une même hauteur de lancement $h$. En traçant $f_2 - f_1$ en fonction de $f_0$, le coefficient directeur de la droite obtenue permet d'accéder à la vitesse.

### *Commentaires*

- La fréquence augmente de $\delta f = f_0 \dfrac{v}{c}$ lorsque le haut-parleur se rapproche, et diminue de la même valeur si le haut-parleur s'éloigne (puisque la valeur de la vitesse est la même).

Ainsi les fréquences mesurées sont :

$$\begin{cases} f_1 = f_0 + f_0 \dfrac{v}{c} \\ f_2 = f_0 - f_0 \dfrac{v}{c} \end{cases}$$

si bien que l'écart entre les deux fréquences est bien $|f_1 - f_2| = f_0 \dfrac{2v}{c}$.

Le fait de mesurer les deux fréquences permet d'obtenir un facteur 2, donc une meilleure précision dans les mesures.

• Il existe un effet Doppler transversal et un effet Doppler longitudinal. Seul ce dernier est étudié ici, ce qui oblige à se placer dans l'axe du haut-parleur (il faut néanmoins légèrement décaler le microphone pour éviter que le haut parleur ne le percute).
La vitesse du haut-parleur n'étant pas constante, le décalage Doppler varie, il sera donc normal de ne pas mesurer des périodes identiques lorsque le haut-parleur se rapproche ou s'éloigne.

• L'incertitude d'une mesure unique est nécessairement assez grande, du fait de l'erreur de lecture des durées. Celle-ci n'est pas réductible autant qu'on le voudrait, même si le système d'acquisition a une fréquence d'échantillonnage élevée.
Prenons l'exemple d'une centrale Latis Pro. Pour acquérir un signal correct, la durée d'acquisition ne peut être réduite en-dessous de 1 s. Avec 256 000 points de mesure, cela donne une période d'échantillonnage de 4 µs. Comme le repérage de l'extrémité d'une période n'est pas précis au pixel près mais à deux pixels près au minimum, cela donne bien une erreur de lecture égale à deux fois la période d'échantillonnage, et ce de chaque côté du repérage. Le nombre de périodes mesurées ne peut pas non plus être augmenté indéfiniment : comme la vitesse n'est pas constante, il ne faut pas faire une mesure sur une durée trop grande, sans quoi la variation de la valeur de la période instantanée est perceptible. Ici, on a pris 20 périodes, soit 20 ms, pour un pendule dont la période était voisine de 1,5 s : la variation n'est pas perceptible. On pourrait prendre 50 périodes, c'est valable aussi (mais plus long à compter à l'écran par l'élève et plus sujet à erreurs). Mais selon le microphone utilisé, il est possible aussi que, lorsque le haut-parleur s'éloigne un peu trop, le signal reçu ne soit pas très beau.
Cette mesure est donc nécessairement entachée d'erreurs. Pour cette raison, cette activité expérimentale a été axée fortement sur une réflexion concernant les incertitudes.

• Cette expérience est une mesure d'un phénomène que les élèves ont déjà constaté, par exemple lorsqu'un véhicule équipé d'une sirène (ou une moto) circule. Il peut donc être intéressant de leur poser la question avant de faire cette activité, par exemple pour comparer le caractère grave ou aigu du son perçu. L'activité peut aussi servir de vérification quantitative.

• Cette manipulation est délicate et peu précise, car le matériel nécessaire pour bien fixer le haut-parleur n'est pas présent dans tous les laboratoires : il ne faut pas que le haut-parleur pivote pendant son mouvement. Un bricolage peut néanmoins faire l'affaire.

# Exercices

## Applications

### 1 Diffraction ou pas ?

**a.** La taille du trou de serrure est bien supérieure à la longueur d'onde de la lumière (inférieure au micromètre) : il n'y a pas diffraction.

**b.** La taille du trou est comparable à la longueur d'onde du son (pour un son de 1 kHz, la longueur d'onde est 34 cm) : il y a diffraction.

### 2 Diffraction par une fente

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

### 3 Diffraction du son

**a.** L'onde sonore de fréquence 20 Hz a une longueur d'onde de 17 m, et celle de fréquence 20 kHz une longueur d'onde de 17 mm.

**b.** La largeur de la fenêtre étant 50 cm, il n'y a pas diffraction pour 20 kHz, et diffraction pour 20 Hz, donc l'onde de fréquence 20 kHz n'est audible que face à la fenêtre.

### 4 Diffraction par un cheveu

**a.** En radians, l'angle de diffraction est :

$$\theta = 0{,}40 \times \frac{\pi}{180} = 7{,}0.10^{-3} \text{ rad.}$$

L'angle de diffraction est $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$.

L'épaisseur du cheveu est :

$$a = \frac{\lambda}{\theta} = \frac{632.10^{-9}}{7{,}0.10^{-3}} = 9{,}1.10^{-5} \text{ m.}$$

### 5 Haut-parleurs

**a.** $\lambda = \dfrac{c}{f}$

• pour $f = 170$ Hz, on a $\lambda = \dfrac{340}{170} = 2{,}00$ m.

• pour $f = 1{,}7$ kHz, on a $\lambda = \dfrac{340}{1{,}7.10^3} = 0{,}20$ m.

• pour $f = 17$ kHz, on a $\lambda = \dfrac{340}{17.10^3} = 2{,}0.10^{-2}$ m.

**b.** Les sons diffractés sont les aigus, car ils correspondent aux faibles longueurs d'onde, qui ne sont pas grandes devant $d$. Un auditeur non en face du haut-parleur entend donc mieux les aigus que les graves.

**c.** Les enceintes ont plusieurs haut-parleurs de diamètres différents car chacun n'émet pas les mêmes fréquences, de façon que le son diffracté par chaque haut-parleur le soit à peu près avec le même angle.

### 6 Différence de marche

**a.** La différence de marche est de 2,5 − 1,5 = 1,0 m, donc les interférences sont constructives et l'amplitude est maximale.

**b.** La différence de marche est de 2,5 − 1,0 = 1,5 m, donc les interférences sont destructives et l'amplitude est minimale.

### 7 Fentes d'Young

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

### 8 Double haut-parleur

**a.** La longueur d'onde est $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{336}{1\,600} = 0{,}210$ m.

**b.** Si O désigne le point situé au milieu des haut-parleurs, un point M sur l'axe des haut-parleurs situé à la distance $x$ de O se trouve à la distance $\frac{d}{2} - x$ d'un haut-parleur, et à la distance $\frac{d}{2} + x$ de l'autre. La différence de marche est donc $\delta = 2x$.

L'amplitude est maximale (interférences constructives) en $x = 0$, et en tout point tel que $\delta = p\lambda$, soit $x = p\frac{\lambda}{2} = 10{,}5 \times p$ (en cm). L'amplitude est minimale (interférences destructives) si $\delta = \left(p + \frac{1}{2}\right)\lambda$ soit $x = \left(p + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2} = 10{,}5 \times \left(p + \frac{1}{2}\right)$ (en cm).

**c.** La différence de marche étant :
(120 − 39) − 39 = 42 cm, soit 2,0 fois la longueur d'onde, l'amplitude est maximale.

### 9 Vaguelettes

**a.** La longueur d'onde est $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3{,}0}{100} = 3{,}0.10^{-2}$ m soit 3,0 cm.

**b.** La différence de marche est $\delta = (d - x) - x = d - 2x$.

**c.** M est sur une frange d'amplitude maximale si $\delta = p\lambda$, avec $p$ entier, soit $x = \frac{d - p\lambda}{2}$.

Pour que $x$ soit compris entre 0 et $d$, $p$ doit varier entre − 7 et 7, donc 15 franges sont observables.

### 10 Insecte

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

### 11 Car horn

**a.** La vitesse de la voiture est :

$$v = 100 \times \frac{1\,000}{3\,600} = 27{,}8 \text{ m.s}^{-1}$$

Donc la fréquence perçue par l'observateur est :

$$f' = f + f\frac{v}{c} = f\left(1 + \frac{v}{c}\right) = 800 \times \left(1 + \frac{27{,}8}{340}\right) = 865 \text{ Hz.}$$

**b.** Lorsque la voiture s'éloigne, la fréquence perçue est $f'' = f\left(1 - \frac{v}{c}\right) = 800 \times \left(1 - \frac{27{,}8}{340}\right) = 735$ Hz.

**c.** L'écart de fréquence est de 130 Hz, donc largement suffisant pour qu'un observateur y soit sensible (l'intervalle est $\frac{f'}{f''} = 1{,}18$, ce qui est environ $2^{3/12}$, soit trois demi-tons de la gamme tempérée).

### 12 Sirène de bateau

**a.** L'observateur resté au port voit le bateau s'éloigner de lui, donc :

$$f_1 = f\left(1 - \frac{v}{c}\right) = 44{,}0 \times \left(1 - \frac{7{,}0}{340}\right) = 43 \text{ Hz.}$$

**b.** Le bateau se rapproche de l'île, donc le promeneur perçoit la fréquence :

$$f_2 = f\left(1 + \frac{v}{c}\right) = 44{,}0 \times \left(1 + \frac{7{,}0}{340}\right) = 45 \text{ Hz.}$$

**c.** Le passager à bord du bateau se rapproche de la falaise, qui émet la fréquence $f_2$, donc il perçoit $f_3 = f_2\left(1 + \frac{v}{c}\right) = 45 \times \left(1 + \frac{7{,}0}{340}\right) = 46$ Hz.

### 13 Andromède

**a.** Les galaxies se rapprochant, la fréquence perçue est supérieure à la fréquence émise.

**b.** Comme $\lambda = \frac{c}{f}$, la longueur d'onde perçue est plus petite que la longueur d'onde émise.

**c.** Les faibles longueurs d'onde correspondant au bleu, la raie se décale vers le bleu, d'où l'expression « blue shift ».

**d.** La longueur d'onde perçue est :

$$\lambda' = \frac{c}{f'} = \frac{c}{f\left(1 + \frac{v}{c}\right)} = \frac{\lambda}{1 + \frac{v}{c}}.$$

On en extrait $\frac{v}{c} = \frac{\lambda}{\lambda'} - 1$, d'où :

$$v = c\left(\frac{\lambda}{\lambda'} - 1\right) = 3{,}00.10^8 \times \left(\frac{518{,}4 - 517{,}9}{517{,}9}\right)$$
$$= 3.10^5 \text{ m.s}^{-1}.$$

## Entraînement

### 14 Diffraction par une ouverture

**a.** Avant l'obstacle, la direction de propagation des ondes est rectiligne, perpendiculairement à l'obstacle. Après l'obstacle, la direction de propagation est quelconque : les ondes se propagent dans toutes

les directions après passage par l'ouverture. La distance entre deux rides consécutives est la même avant et après l'obstacle : la longueur d'onde ne change pas. Cela illustre donc bien la diffraction.

**b.** La dimension de l'obstacle est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde.

**c.** Dans le cas de la diffraction des ondes lumineuses, il faudrait analyser le spectre de la lumière avant et après l'ouverture, par exemple avec un prisme, pour vérifier que la longueur d'onde ne change pas.

### 15 Trombone de Koenig

**a.** Le haut-parleur émet une onde sonore, qui se divise en deux parties se propageant chacune dans un tube.

**b.** L'onde se propageant dans le tube coulissant doit parcourir la distance $2L$ en plus de l'autre onde, donc $\delta = 2L$.

**c.** En augmentant $L$, les deux ondes se déphasent, donc interfèrent en donnant un signal dont l'amplitude dépend de $L$.

**d.** L'amplitude est maximale si $\delta = p\lambda$ (interférences constructives). Comme c'est le troisième maximum $2L = 3\lambda$ donc $\lambda = 20$ cm.

### 16 Réflexion sur un mur

**a.** Le mur réfléchit le son. Au niveau du microphone sont donc présentes deux ondes sonores : l'onde incidente et l'onde réfléchie, qui peuvent ainsi interférer.

**b.** Pour un déplacement $x$ du microphone, l'onde réfléchie doit parcourir la distance $2x$ en plus. Un déplacement de 5,00 cm du microphone correspond donc à une différence de marche supplémentaire de 10,0 cm. Or cette différence de marche est égale à $\frac{\lambda}{2}$, puisque l'amplitude passe d'un maximum à un minimum, donc $\lambda = 20{,}0$ cm.

La célérité est $c = \lambda f = 0{,}200 \times 1\,700 = 340$ m.s$^{-1}$.

### 17 Radar !

**a.** Le véhicule se rapprochant du radar $f' = f\left(1 + \frac{v}{c}\right)$.

**b.** Le radar et le véhicule se rapprochant, $f''$ sera supérieure à $f'$, soit $f'' = f'\left(1 + \frac{v}{c}\right)$.

**c.** Finalement $f'' = f'\left(1 + \frac{v}{c}\right) = f\left(1 + \frac{v}{c}\right)^2$.

**d.** L'écart de fréquence est :

$$f'' - f = f\left(\left(1 + \frac{v}{c}\right)^2 - 1\right) = 5{,}81.10^3 \text{ Hz}.$$

La vitesse du véhicule est :

$$v = c\left(\sqrt{\frac{f''}{f}} - 1\right) = 3{,}00.10^8 \times \left(\sqrt{1 + \frac{4{,}02.10^3}{24{,}125.10^9}} - 1\right)$$

$= 25{,}0$ m.s$^{-1}$ soit 90,0 km.h$^{-1}$.

**e.** La plus petite variation de vitesse détectable est :

$$\delta v = c\left(\sqrt{\frac{f + \delta f}{f}} - 1\right) = 3{,}00.10^8 \times \left(\sqrt{1 + \frac{45}{24{,}125.10^9}} - 1\right)$$

$= 0{,}28$ m.s$^{-1}$ soit 1,0 km.h$^{-1}$.

*Remarque* : pour le corrigé de cet exercice, il a été choisi d'effectuer les calculs comme l'élève peut les faire, c'est-à-dire sans développements limités à l'ordre 1. Les résultats sont évidemment les mêmes en utilisant les développements limités $(1 + x)^2 = 1 + 2x$ ou $\sqrt{1 + x} = 1 + \frac{x}{2}$, pour $x$ petit.

### 18 Diffraction en lumière blanche

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 633.*

### 19 Redshift

Par effet Doppler, la fréquence perçue est différente de la fréquence émise. La longueur d'onde change donc également.

Les raies sont décalées par effet Doppler, les astres dont la lumière est analysée étant en mouvement. Selon que la longueur d'onde augmente ou diminue, la raie se décale vers le rouge ou le bleu.

Si l'astre s'éloigne, la fréquence diminue, donc il y a décalage vers les grandes longueurs d'onde c'est-à-dire vers le rouge, donc le spectre correspondant est le deuxième.

Ces spectres permettent de connaître la vitesse des astres.

### 20 Diffractions multiples

**a.** La lumière arrive sur l'écran dans des directions différentes de la direction de propagation avant la fente, ce qui met en évidence sa déviation par phénomène de diffraction.

**b.** La demi-ouverture angulaire de la tache centrale de diffraction est, en radians :

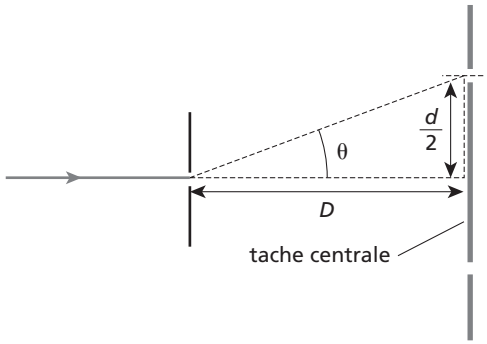
$$\theta = \frac{\lambda}{a} = \frac{650.10^{-9}}{0{,}28.10^{-3}} = 2{,}3.10^{-3} \text{ rad}$$

ce qui correspond à $2{,}3.10^{-3} \times \frac{180}{\pi} = 0{,}13°$.

**c.** La demi-ouverture angulaire est dix fois plus grande si la fente est dix fois plus étroite (1,3°), et elle est dix fois moins grande si la fente est dix fois plus large (0,013°). Le phénomène de diffraction est donc négligeable si la fente est trop large, c'est-à-dire si sa largeur est grande devant la longueur d'onde.

**d.** L'angle de diffraction étant faible $\theta = \dfrac{d/2}{D}$

donc $d = 2D\theta = 2 \times 3{,}0 \times 2{,}3.10^{-3} = 1{,}4.10^{-2}$ m soit 1,4 cm.




**e.** La figure de diffraction est inchangée si la fente est remplacée par un fil dont l'épaisseur est égale à la largeur de la fente.

**f.** Si $d = 4{,}0$ mm, la demi-ouverture angulaire est $\theta' = \dfrac{d/2}{D} = \dfrac{2{,}0.10^{-3}}{3{,}0} = 6{,}7.10^{-4}$ rad,

donc $a' = \dfrac{\lambda}{\theta} = 9{,}8.10^{-4}$ m.

## Approfondissement

### 21 Mesure de la vitesse du sang

**a.** Lorsque l'onde ultrasonore se propage dans le même sens que la vitesse du sang, $f' = f + f\dfrac{v}{c}$.

**b.** Si les rôles de E et R sont inversés, $f'' = f - f\dfrac{v}{c}$

**c.** $\Delta f = \left|f'' - f'\right| = 2f\dfrac{v}{c}$

L'écart mesuré est deux fois plus grand en procédant ainsi, ce qui améliore la précision de la mesure.

**d.** $v = c\dfrac{\Delta f}{2f} = 1\,500 \times \dfrac{1\,700}{2 \times 5.10^6} = 0{,}25$ m.s$^{-1}$.

### 22 Audition étrange

**a.** Les deux parleurs émettent des ondes sonores synchrones, qui peuvent interférer en se superposant.

**b.** L'oreille gauche est à égale distance des haut-parleurs, donc la différence de marche est nulle. L'auditeur entend un maximum d'amplitude, et ceci quelle que soit la fréquence.

**c.** L'auditeur entend également un maximum de l'oreille droite si celle-ci se situe sur une frange d'amplitude maximale, donc si $d$ est égal à un nombre entier d'interfranges : $d = pi = p\dfrac{\lambda D}{a}$ avec $p$ entier.

Donc $\lambda = \dfrac{1}{p} \times \dfrac{ad}{D}$

et $f = \dfrac{c}{\lambda} = p \times \dfrac{cD}{ad} = p \times 1{,}4.10^4$ Hz.

Seule $f = 14$ kHz (pour $p = 1$) est une fréquence audible.

**d.** Pour entendre un minimum sur l'oreille droite, il faut avoir $d = \left(p + \dfrac{1}{2}\right)i = \left(p + \dfrac{1}{2}\right)\dfrac{\lambda D}{a}$

donc $f = \dfrac{c}{\lambda} = \left(p + \dfrac{1}{2}\right) \times \dfrac{cD}{ad} = \left(p + \dfrac{1}{2}\right) \times 1{,}4.10^4$.

Seule $f = 6{,}8$ kHz (pour $p = 0$) convient.

### 23 Interférences en lumière polychromatique

**a.** Sur l'écran sont observées des franges brillantes et sombres, parallèles aux fentes. Les fentes doivent être très fines pour permettre la diffraction de la lumière, laquelle doit arriver en de nombreux points sur l'écran.

**b.** $i = \dfrac{\lambda_0 D}{a} = \dfrac{510.10^{-9} \times 1{,}5}{1{,}0.10^{-3}} = 7{,}7.10^{-4}$ m.

**c.** Sur l'écran sont observés deux systèmes de franges, dont les interfranges sont différentes puisque $i$ dépend de $\lambda$.

**d.** Les interfranges sont respectivement :

$$i_1 = \frac{\lambda_1 D}{a} = \frac{420.10^{-9} \times 1{,}5}{1{,}0.10^{-3}} = 6{,}3.10^{-4} \text{ m}$$

et $i_2 = \dfrac{\lambda_2 D}{a} = \dfrac{630.10^{-9} \times 1{,}5}{1{,}0.10^{-3}} = 9{,}5.10^{-4}$ m.

Pour avoir coïncidence entre les franges brillantes, il faut que la distance entre O et la position cherchée soit un multiple entier des deux interfranges : $pi_1 = qi_2$ avec $p$ et $q$ entiers.

Or $\dfrac{i_2}{i_1} = \dfrac{3}{2}$, donc $p = 3$ et $q = 2$ conviennent.

La distance cherchée est $3i_1 = 2i_2 = 1{,}9.10^{-3}$ m.

### 24 Compter les franges

**a.** L'interfrange est :

$$i = \frac{\lambda D}{a} = \frac{589.10^{-9} \times 1{,}0}{0{,}80.10^{-3}} = 7{,}4.10^{-4} \text{ m}.$$

**b.** La largeur $L$ sur l'écran qui se trouve dans le cône de diffraction est telle que $\tan\theta = \dfrac{L}{2D}$

donc $L = 1{,}7.10^{-1}$ m. Le nombre de franges visibles sur l'écran est alors $\dfrac{L}{i} = \dfrac{1{,}7.10^{-1}}{7{,}4.10^{-4}} = 230$ franges.

**c.** Pour augmenter la distance entre les franges, il faut reculer l'écran. Le nombre de franges ne change pas car le cône de diffraction reste le même.

### 25 Franges circulaires

**a.** Au point H, la différence de marche est :

$$\delta = S_1H - S_2H = S_1S_2 = 5{,}9.10^{-6} \text{ m}.$$

Or $\frac{\delta}{\lambda} = \frac{5{,}9.10^{-6}}{589.10^{-9}} = 10$ donc l'éclairement est maximum en H (interférences constructives).

**b.** La différence de marche ne dépend que de θ, donc tous les points correspondant à une valeur d'angle sont sur une même frange. Cet ensemble de points est bien un cercle, dont le centre est H.

**c.** Sur une frange brillante $\delta = p\lambda$, avec $p$ entier, donc les angles définissant les cercles brillants vérifient $\cos\theta = p\frac{\lambda}{a} = \frac{p}{10}$, ce qui donne :

$\theta_1 = 25{,}8°$ pour $p = 9$,

$\theta_2 = 36{,}9°$ pour $p = 8$,

$\theta_3 = 45{,}6°$ pour $p = 7$.

Les rayons des cercles sont donnés par $\tan\theta = \frac{r}{D}$ d'où $r_1 = 0{,}97$ m, $r_2 = 1{,}5$ m et $r_3 = 2{,}0$ m.

## Exercices de BAC

### 26 Interférences

**1.** Des interférences sont observées sur l'écran car deux faisceaux issus des deux sources secondaires $S_1$ et $S_2$ se superposent.

Les interférences sont constructives (maximum d'amplitude) si les deux vibrations sont en phase, et les interférences sont destructives (minimum d'amplitude) si les deux vibrations sont en opposition de phase.

**2.** Les deux vibrations lumineuses parcourent exactement la même distance pour arriver au point O, donc la différence de marche est nulle. Ceci signifie que les deux vibrations sont en phase et que les interférences sont constructives : la frange passant par O est brillante.

**3.a.** L'interfrange $i$, la longueur d'onde λ, la distance $a$ entre les fentes, la distance $d$ entre la source et les fentes et la distance $D$ entre les fentes et l'écran sont des longueurs : L.

① $i = \frac{\lambda D}{a}$ est possible car $L \times L \times L^{-1} = L$

② $i = \lambda D^2$ est impossible car $L \times L \times L = L^3$

③ $i = \frac{Da}{\lambda}$ est possible car $L \times L \times L^{-1} = L$

④ $i = \frac{\lambda a}{D}$ est possible car $L \times L \times L^{-1} = L$

⑤ $i = \frac{\lambda d}{a}$ est possible car $L \times L \times L^{-1} = L$

**b.** Comme la longueur d'onde d'un laser vert est inférieure à celle du laser rouge hélium-néon, l'interfrange diminue si la longueur d'onde diminue donc ③ est impossible.

Comme l'interfrange augmente en éloignant l'écran, elle augmente si $D$ augmente, ce qui signifie que ④ est impossible.

L'interfrange étant indépendante de la position de la source, elle ne doit pas dépendre de $d$ : ⑤ est impossible.

Enfin les franges s'écartent si les trous se rapprochent de l'axe, ce qui signifie que l'interfrange augmente si $a$ diminue : ② est impossible.

Finalement, la bonne expression est : $i = \frac{\lambda D}{a}$.

**4.** La valeur de l'interfrange est :

$$i = \frac{\lambda D}{a} = \frac{633.10^{-9} \times 4{,}0}{500.10^{-6}} = 5{,}0 \text{ mm}.$$

### 27 Radars… et effet Doppler

**I.1.** Faux : une onde se propage sans transport de matière, il y a seulement vibration de la matière, autour d'une position fixe.

**2.** Faux : la longueur d'onde dépend du milieu de propagation, c'est la fréquence qui n'en dépend pas.

**3.** Faux : pour une distance $L = 51{,}0$ m, la durée de propagation est $\Delta t = \frac{L}{c}$ ce qui donne $\Delta t = \frac{51{,}0}{340} = 0{,}15$ s, ce qui est différent de 1,5 s.

**4.** Faux : la distance parcourue par le front d'onde pendant trois périodes est $d = 3cT = \frac{3c}{f}$, ce qui donne $d = \frac{3 \times 340}{680} = 1{,}5$ m, ce qui est différent de 40,0 m.

**5.** Vrai car deux points qui vibrent en phase sont séparés par une distance égale à un nombre entier de longueurs d'onde. En écrivant $d' = n\lambda$, une valeur entière de $n$ est bien obtenue :

$$n = \frac{d'}{\lambda} = \frac{d'f}{c} = \frac{55 \times 680}{340} = 110.$$

**6.** Faux : la distance parcourue étant $2d''$ puisqu'il y a réflexion, la durée de l'aller-retour est $\Delta t = \frac{2d''}{c}$, ce qui donne $\Delta t = \frac{2 \times 680}{340} = 4{,}0$ s, et non 2,0 s (qui correspond uniquement à l'aller ou au retour).

**II.1.a.** La relation est : $\lambda = \frac{c}{f}$.

**b.** D'après la relation (1) : $\lambda' = \lambda - vT$.

En utilisant ce qui précède : $\frac{c}{f'} = \frac{c}{f} - v\frac{1}{f}$, ce qui se simplifie selon $\frac{c}{f'} = \frac{c-v}{f}$, qui donne bien $f' = f\frac{c}{c-v}$.

**c.** Comme $\frac{c}{c-v} > 1$ alors $f' > f$, ce qui signifie que le son perçu est plus aigu que le son émis.

**2.a.** En inversant le sens du déplacement par rapport à ce qui précède, la longueur d'onde devient : $\lambda'' = \lambda + vT$, donc les mêmes calculs donnent $f'' = f\frac{c}{c+v}$.

**b.** Comme $\frac{c}{c+v} < 1$ c'est-à-dire $f'' < f$, le son perçu est maintenant plus grave que le son émis.

**3.** La vitesse s'exprime selon $v = \left(\frac{f'}{f} - 1\right)c$, ce qui donne $v = \left(\frac{716}{680} - 1\right) \times 340 = 18$ m.s$^{-1}$, soit 65 km.h$^{-1}$.

### 28 Diffraction des ondes lumineuses

**a.** Les longueurs d'onde dans le vide associées aux radiations visibles sont comprises entre 400 et 800 nm.

**b.** Une onde lumineuse peut se propager dans le vide, et ne nécessite pas de support matériel ; ce n'est pas une onde mécanique mais une onde électromagnétique.

**c.** La relation est $\lambda = cT$ avec $c$ en m.s$^{-1}$, $T$ en s et $\lambda$ en m.

**d.** En inversant la relation précédente, la période est $T = \frac{\lambda}{c}$ ce qui donne $T = \frac{411 \times 10^{-9}}{3{,}00 \times 10^{8}} = 1{,}37.10^{-15}$ s.

**e.** La relation donnant l'écart angulaire du faisceau diffracté est $\theta = \frac{\lambda}{a}$.

**f.** D'après le schéma, l'angle s'exprime selon $\tan\theta = \theta = \frac{\frac{d}{2}}{D}$, ce qui donne $\theta = \frac{d}{2D}$.

**g.** Avec $\theta = \frac{d}{2D}$ d'une part, et $\theta = \frac{\lambda}{a}$ d'autre part, la largeur de la fente est bien $a = \frac{2\lambda D}{d}$.

**h.** Pour $d = 1{,}0$ mm :
$a = \frac{2 \times 411 \times 10^{-9} \times 0{,}20}{1{,}0 \times 10^{-3}} = 1{,}6.10^{-4}$ m $= 0{,}16$ mm.

Pour $d = 0{,}10$ mm :
$a = \frac{2 \times 411 \times 10^{-9} \times 0{,}20}{0{,}10 \times 10^{-3}} = 1{,}6.10^{-3}$ m $= 1{,}6$ mm.

### 29 Interférences à la surface de l'eau

**1.a.** La longueur d'onde est :
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{0{,}40}{20} = 2{,}0.10^{-2} \text{ m soit } 2{,}0 \text{ cm.}$$

**b.** Avec $d = 12$ cm, $d = 6\lambda$ donc le point M vibre en phase avec le point source S car il est situé à un nombre entier de longueurs d'onde de celui-ci.

**2.a.** La différence de marche est :
$\delta = S_2P_1 - S_1P_1 = 17 - 8{,}0 = 9$ cm soit $\delta = 4{,}5\lambda$ : les interférences sont destructives et le point $P_1$ a une amplitude de vibration nulle.

**b.** La différence de marche est nulle au point O car il est à égale distance de $S_1$ et $S_2$, donc les interférences sont constructives.
L'amplitude est donc maximale et vaut $A = 2a$.

**c.** Si $x$ désigne la position d'un point par rapport à O, la différence de marche est :
$$\delta = (S_1S_2 + x) - (S_1S_2 - x) = 2x.$$
Comme celle-ci varie de $\lambda$ entre deux points consécutifs d'amplitude maximale, cela correspond bien à une distance de $\frac{\lambda}{2}$.

**d.** La distance entre deux points consécutifs d'amplitude maximale est $\frac{\lambda}{2} = 1{,}0$ cm. O est un point d'amplitude maximale et se situe à 5,5 cm de $S_1$ et $S_2$, donc il y a 5 points d'amplitude maximale à gauche de O et 5 points à droite de O, soit 11 points au total.

## Rédiger une synthèse de documents

### 30 Applications de l'effet Doppler

*Analyse de la question*

La question demande, d'une part, d'expliquer comment une mesure de fréquences permet d'en déduire la vitesse de déplacement de la source et, d'autre part d'interpréter le fait que le type d'onde à utiliser dépend de la source et de sa vitesse.

Ces questions invitent à utiliser le paragraphe 3.4 du cours, portant sur les applications de l'effet Doppler, ainsi que le document 2 p. 103 du manuel de l'élève, donnant des informations sur les radars routiers. Elles nécessitent donc de faire le lien entre la fréquence et la vitesse de la source, ainsi que d'apprécier si la mesure est réalisable ou non, selon le type d'onde utilisé.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Il faut donner la relation du **décalage Doppler**, donnée dans le paragraphe 3.4 du cours, et l'inverser pour exprimer la vitesse de la source en fonction du décalage de fréquences.

**2.** Il faut dire clairement que la fréquence augmente si la source se rapproche, et qu'elle diminue si la source s'éloigne : la comparaison de la fréquence émise et de la fréquence perçue permet de connaître le **sens de déplacement**. En astrophysique, cela se traduit par le *blueshift* ou le *redshift*.

**3.** Il est possible d'expliquer que pour que le décalage soit mesurable, la valeur de $\frac{v}{c}$ ne doit pas être trop faible : par exemple des ondes ultrasonores sont utilisées pour mesurer la **vitesse du sang** car cette vitesse est bien trop faible devant la célérité d'autres types d'ondes comme des ondes électromagnétiques.

**4.** Détailler également les **conditions de la mesure** : la **vitesse des véhicules** est mesurée avec des ondes électromagnétiques et non acoustiques car, bien que cette vitesse soit faible devant la vitesse du son, les ondes sonores se propagent beaucoup plus lentement que les ondes électromagnétiques, donc la mesure prendrait beaucoup plus de temps, sans compter que les ondes électromagnétiques sont beaucoup plus directives.

**5.** Il faut aussi différencier les cas où l'onde est envoyée sur une source dont la vitesse doit être mesurée (radars, sonars, etc.) des cas où la source émet naturellement une onde. Ainsi, la **vitesse des étoiles** est mesurée grâce aux ondes électromagnétiques parce qu'elles n'émettent que ce type d'onde.

Chapitre 4

# Analyse spectrale

## Introduction au chapitre (p. 104)

Ce chapitre est le dernier de la partie *Observer*. Il aborde l'analyse et la caractérisation des molécules *via* l'utilisation des trois spectroscopies les plus courantes au laboratoire : UV-visible, IR et RMN.

L'étude des spectres UV-visible n'introduit pas de difficulté majeure, compte tenu du programme de Première S (lien entre couleur perçue et longueur d'onde au maximum d'absorption de substances organiques ou inorganiques). La caractérisation par spectroscopie UV-visible consiste alors à faire une liste des maxima d'absorption et à donner les coefficients d'absorption molaires associés (déterminés par la loi de Beer-Lambert).

Concernant la spectroscopie IR, nous avons adopté une approche pragmatique. Il nous a semblé illusoire et hors programme d'expliquer en détail la technologie et les bases physiques sous-jacentes à cette spectroscopie. Nous nous sommes limités à associer les absorptions à des vibrations de liaisons et plus précisément aux vibrations d'élongations de liaisons (à l'exception de la liaison N—H, présentant des vibrations d'élongations entre 3 100 et 3 500 $cm^{-1}$ et une vibration de déformation entre 1 560 et 1 640 $cm^{-1}$). La notion de vibration est présente, par ailleurs, dans le programme avec les ondes ou les oscillateurs. Il a été ainsi choisi dans le livre de limiter la lecture des spectres à un intervalle de nombres d'onde allant de 1500 à 4000 $cm^{-1}$ ; l'étude, complexe, de la zone entre 600 et 1 500 $cm^{-1}$, appelée *empreinte digitale*, n'étant pas utilisée pour l'étude des groupes caractéristiques, elle nous a semblé hors de propos en Terminale S. La spectroscopie IR permet donc dans un premier temps de signaler la présence (et l'absence) de certaines liaisons chimiques dans une molécule et dans un deuxième temps d'en déduire la présence de groupes caractéristiques.

La description du phénomène physique à l'origine de la spectroscopie ne sera pas étudiée non plus pour la RMN. Le but de cette partie est uniquement la mise en relation d'un spectre RMN avec la structure de la molécule correspondante. Les paramètres « déplacement chimique », « aire » et « multiplicité des signaux » sont pris en compte. Il s'agit donc de définir chacun de ces paramètres et de proposer une méthode d'analyse du spectre (ce qui est introduit lors de l'activité 3 p. 109). On soulignera les difficultés associées au déplacement chimique. Cette grandeur a été définie p 116 à l'aide de la fréquence de $\nu_{mes}$ de l'onde émise par le proton qui est entré en résonance. Ce choix permet d'une part de distinguer la RMN des spectroscopies IR et UV-visible, qui sont des spectroscopies d'absorption, et d'autre part de donner du sens au R (résonance) de RMN. Enfin, nous avons choisi de ne pas donner de tables complexes de déplacement chimique mais de nous limiter à la **figure 16** p. 117, qui montre l'influence de l'environnement chimique sur le déplacement chimique. Bien que très simple et incomplète, cette figure sera, dans la majorité des cas, suffisante à l'interprétation de spectres RMN en Terminale S. On se méfiera toutefois des effets cumulatifs lorsqu'un proton est entouré de plusieurs groupes électroattracteurs. En effet, selon la **figure 16**, un H porté par un carbone fonctionnalisé par un atome d'halogène résonne entre 2,9 et 4,3 ppm mais, par exemple, le déplacement chimique des protons du dichlorométhane $CH_2Cl_2$ est en réalité de 5,3 ppm du fait de l'effet cumulé des deux Cl.

## Activités

### 1 Comment exploiter un spectre infrarouge ? (p. 106)

***Objectif***

Cette activité introductive met en évidence le lien entre les absorptions IR et les liaisons chimiques, la présence de ces dernières permettant de déterminer les groupes caractéristiques présents sur une molécule dont le spectre est connu.

L'idée est de faire créer par l'élève, de façon simplifiée et à partir d'un ensemble de spectres expérimentaux, une table liant une liaison chimique donnée au nombre d'onde de l'absorption IR.

Le second objectif de cette activité est d'initier l'élève à pouvoir repérer les groupes caractéristiques présents au sein d'une molécule donnée à partir de la présence ou de l'absence de liaisons chimiques.

### *Correspondance avec le programme*

• Identifier des liaisons chimiques à l'aide d'un nombre d'onde.

• Exploiter un spectre IR pour déterminer un groupe caractéristique.

### *Corrigé*

**a.** Sur les deux spectres, on repère des bandes d'absorption entre 2 800 et 3 000 $cm^{-1}$ qui correspondent aux liaisons $C_{ane}$—H.

Le spectre du cyclohexyléthène présente en plus deux absorptions : l'une à 3 100 $cm^{-1}$ et l'autre à 1 650 $cm^{-1}$.

**b.** Le cyclohexyléthène présente deux types de liaisons absentes dans l'éthylcyclohexane : les liaisons $C_{ène}$—H et la liaison C=C. Compte tenu de sa valeur, proche de celle des absorptions des $C_{ane}$—H, l'absorption à 3 100 $cm^{-1}$ est associée à $C_{ène}$—H.

On en déduit que le nombre d'onde caractéristique de la liaison C=C est 1 650 $cm^{-1}$.

**c.** On compare les spectres des espèces chimiques 1 à 7 avec celui de l'éthylcyclohexane.

Les différences correspondent à la présence de nouvelles liaisons chimiques, absentes sur l'éthylcyclohexane. Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous :

| Espèce chimique | Liaisons chimiques | Bandes d'absorptions remarquables ($cm^{-1}$) |
|---|---|---|
| 1 | O—H | 3 300 |
| 2 | N—H | 3 250, 3 350 et 1 600 |
| 3 | C=O<br>$C_{ald}$—H | 1 725 et 2 700 |
| 4 | C=O | 1 710 |
| 5 | C=O<br>O—H | 1 700 et 3 100 (bande large) |
| 6 | C=O | 1 740 |
| 7 | C=O<br>N—H | 1 560, 1 650 et 3 300 |

**d.** On observe les absorptions des liaisons $C_{ane}$—H entre 2 900 et 3 000 $cm^{-1}$ ainsi qu'une absorption à 1 720 $cm^{-1}$, caractéristique d'une liaison C=O.

L'absence de toute autre bande caractéristique pour le spectre du composé 8 indique que ce dernier est une cétone, peut-être la butanone.

### *Commentaire*

Pour la question **c.** d'après les spectres 4 et 6, la liaison C=O est associée à une bande d'absorption autour de 1 720 $cm^{-1}$.

Cette absorption se retrouve :

• sur le spectre 3 (1 720 $cm^{-1}$),

• sur le spectre 5 (1 700 $cm^{-1}$)

• et sur le spectre 7 (avec une valeur un peu plus faible : 1 650 $cm^{-1}$).

Cette attribution permet d'associer l'absorption du spectre 3 à 2 700 $cm^{-1}$ à la liaison $C_{ald}$—H.

Cette dernière sort, en fait, sous la forme d'un doublet ; on peut en effet observer un épaulement à 2 810 $cm^{-1}$.

D'après le spectre 1, la liaison O—H est associée à une bande d'absorption autour de 3 330 $cm^{-1}$. Cette valeur peut varier de beaucoup selon la molécule considérée et la façon dont l'échantillon a été préparé (pastille solide ou solution).

On retrouve ainsi cette absorption à 3 100 $cm^{-1}$ sur le spectre 5.

D'après le spectre 2, la liaison N—H est associée à deux absorptions : une vers 3 300 $cm^{-1}$ (pour l'espèce chimique 2, il s'agit d'un doublet à 3 250 et 3 350 $cm^{-1}$) et une bande vers 1 600 $cm^{-1}$. Ces absorptions se retrouvent sur le spectre 7 (1 560 et 3 300 $cm^{-1}$).

## 2 Comment exploiter un spectre UV-visible ? (p. 108)

### *Objectif*

Le but de cette activité est d'exploiter la loi de Beer-Lambert, vue en Première S, pour déterminer les caractéristiques spectroscopiques d'une molécule. Pour cela, l'élève est conduit à repérer les maxima d'absorption sur un spectre fourni et à calculer les coefficients d'absorption molaires associés.

### *Correspondance avec le programme*

• Exploiter des spectres UV-visible.

• Déterminer la longueur d'onde au maximum d'absorption pour des substances organiques ou inorganiques.

### *Corrigé*

**a.** On mesure pour $\lambda = \lambda_{max} = 222$ nm l'absorbance $A_{222} = 0{,}81$.

On applique la loi de Beer-Lambert pour connaître le coefficient d'absorption molaire de l'isoprène à 222 nm :

$$\varepsilon_{222} = \frac{A_{222}}{\ell c}$$

$$\varepsilon_{222} = \frac{0{,}81}{1{,}0 \times 4{,}0.10^{-5}} = 2{,}0.10^{4}\ \text{L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$$

La description du spectre de l'isoprène est donc : ($\lambda_{max} = 222$ nm et $\varepsilon_{222} = 2{,}0.10^{4}$ L.mol$^{-1}$.cm$^{-1}$)

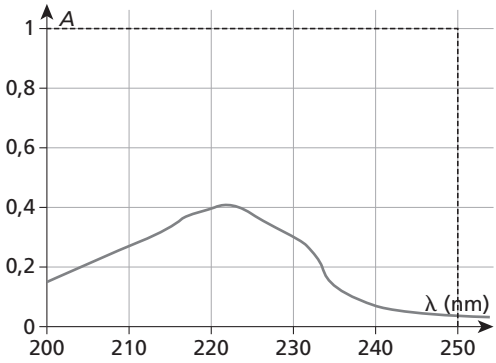
**b.** Le maximum d'absorption $\lambda_{max}$ est de 222 nm : il est donc dans l'UV.

La molécule n'absorbant pas les rayonnements entre 400 et 800 nm, elle est incolore. Pour être vert, l'échantillon aurait dû absorber la couleur complémentaire (voir le triangle des couleurs) c'est-à-dire absorber autour de 770 nm.

**c.** D'après la loi de Beer-Lambert, l'absorbance est deux fois plus faible pour un échantillon deux fois plus dilué. On peut réunir les résultats dans le tableau ci-dessous :

| Longueur d'onde (nm) | Absorbance repérée sur le spectre ($c = 4{,}0.10^{-5}$ mol.L$^{-1}$) | Absorbance calculée pour l'échantillon dilué ($c = 2{,}0.10^{-5}$ mol.L$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 200 | 0,26 | 0,13 |
| 210 | 0,52 | 0,26 |
| 220 | 0,78 | 0,39 |
| 230 | 0,59 | 0,30 |
| 240 | 0,10 | 0,05 |

L'allure du spectre pour un échantillon deux fois plus dilué est alors la suivante :




Seul l'échantillon C présente un unique maximum d'absorption à 222 nm. Lui seul peut donc correspondre à l'isoprène.

### *Commentaires*

• Pour la question **b.** le fait que le maximum d'absorption soit dans l'UV ne suffit pas pour qu'un composé soit incolore.

Les ions $I_3^-$ en solution aqueuse, par exemple, ont leur maximum d'absorption dans l'UV et sont pourtant colorés.

• Pour la question **d.** le fait que l'absorbance de l'échantillon au maximum d'absorption soit de 0,28 n'est pas incompatible avec le fait que la valeur correspondante sur la **figure 6** soit de 0,82.

La concentration est simplement différente dans les deux cas.

## 3 Comment exploiter un spectre RMN ? (p. 109)

### *Objectifs*

Le but de cette activité est de se familiariser avec la méthode développée dans le bloc *aides et méthodes*.

Il est suggéré à l'élève d'utiliser chaque spectre pour travailler sur un point différent de la méthode : le spectre 1 peut être interprété à l'aide du signal intégral seulement, le spectre 2 nécessite l'utilisation de la multiplicité des signaux et le spectre 3 celle des déplacements chimiques.

### *Correspondance avec le programme*

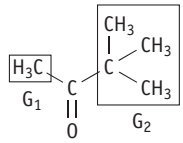
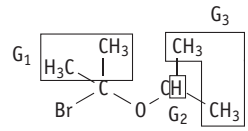
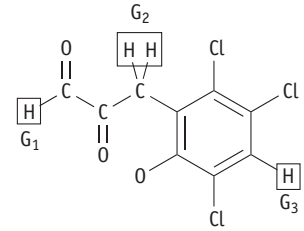
• Relier un spectre RMN simple à une molécule organique donnée, à l'aide de tables de données.

• Identifier les protons équivalents.

• Relier la multiplicité du signal au nombre de voisins.

### *Corrigé*

Les interprétations sont réunies dans un tableau. Les cases grisées ne sont pas indispensables à l'attribution des signaux mais permettent de confirmer l'interprétation du spectre.

| Étape de la méthode | Spectre 1 | Spectre 2 | Spectre 3 |
|---|---|---|---|
| 1 |  <br>2 groupes de protons équivalents : $G_1$ (3 H) et $G_2$ (9 H). |  <br>3 groupes de protons équivalents : $G_1$ (6 H), $G_2$ (1 H) et $G_3$ (6 H). |  <br>3 groupes de protons équivalents : $G_1$ (1 H), $G_2$ (2 H) et $G_3$ (1 H). |
| 2 | Le palier de la courbe intégrale à 1,2 ppm est trois fois plus haut que celui à 2,15 ppm. Les H de $G_1$ résonnent donc à 2,15 ppm et ceux de $G_2$ à 1,2 ppm. | Le palier de la courbe intégrale à 3,2 ppm est le seul à correspondre à 1 H. C'est donc le signal associé à $G_2$. | Le palier de la courbe intégrale à 3,7 ppm est deux fois plus haut que les autres. Les H de $G_2$ résonnent donc à 3,7 ppm. |
| 3 | Les H de $G_1$ et $G_2$ n'ont aucun H voisin (à distance de trois liaisons chimiques).<br>Les signaux sont donc des singulets. | Le signal associé à $G_1$ est un singulet (aucun voisin) et celui associé à $G_3$ un doublet (un seul voisin, le H de $G_2$).<br>Le signal à 1,1 ppm correspond donc à $G_3$ et celui à 2 ppm à $G_1$. | Les protons de $G_1$, $G_2$ et $G_3$ n'ont aucun H voisin.<br>Leurs signaux RMN sont donc tous des singulets. |
| 4 | Les déplacements chimiques (voir **fig. 16** p. 117 du manuel de l'élève) sont cohérents avec l'attribution. En effet, des protons dont l'environnement chimique est celui de G1 doivent résonner entre 1,9 et 3,3 ppm et des protons dont l'environnement chimique est celui de G2 doivent résonner entre 0,8 et 1,8 ppm.<br>C'est le cas. | Les déplacements chimiques (voir **fig. 16** p. 117) sont cohérents avec l'attribution. En effet, des protons dont l'environnement chimique est celui de G2 doivent résonner entre 3,2 et 3,9 ppm et des protons dont l'environnement chimique est celui de $G_1$ ou de $G_3$ doivent résonner entre 0,8 et 1,8 ppm (le déplacement chimique pour $G_1$ est ici un peu plus élevé du fait de la présence de Br). | Le déplacement chimique de $G_2$ est un peu plus élevé que celui prévu par la **figure 16** p. 117 (entre 1,9 et 3,3 ppm) du fait des effets cumulés du groupe carbonyle et du noyau aromatique.<br>Le déplacement chimique de 9,5 ppm est caractéristique d'un proton aldéhydique ($G_1$) et celui de 7,4 ppm l'est pour un proton aromatique ($G_3$). |

## 4 Caractérisation des colorants d'un sirop de menthe (p. 110)

### *Objectif*

Il s'agit, pour cette activité expérimentale, de rechercher les caractéristiques spectroscopiques d'une molécule (du bleu patenté) afin de repérer sa présence dans un sirop de menthe. Les élèves devront réaliser la dilution d'une solution de colorant et en mesurer l'absorbance dans le visible. Cette activité sera également l'occasion de réfléchir aux sources d'incertitudes associées à des opérations de dilution ainsi que de réutiliser la loi de Beer-Lambert.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre un protocole expérimental pour caractériser une espèce colorée.

### *Liste du matériel*

- 1 pipette jaugée : 5 mL.
- 2 fioles jaugées : 50 mL et 500 mL.
- 2 béchers de 50 mL pour le prélèvement.
- 2 cuves de spectrophotomètre.
- 1 pissette d'eau distillée.
- 1 spectrophotomètre
- Du sirop de menthe.
- Une solution de bleu patenté de concentration $1{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

***Corrigé***

**a.** La dilution d'un facteur 100 requiert une pipette jaugée et une fiole jaugée. Les volumes seront choisis les plus grands possible pour minimiser les incertitudes relatives. Par exemple, on pourra utiliser une pipette jaugée de 5 mL avec une fiole jaugée de 500 mL.

**b.** Les incertitudes sur la verrerie utilisée sont les suivantes :

| Matériel de verrerie | Incertitude absolue |
|---|---|
| Pipette jaugée de volume $V_i = 5$ mL | $\Delta V_i = 0{,}02$ mL |
| Fiole jaugée de volume $V_f = 500$ mL | $\Delta V_f = 0{,}2$ mL |

L'incertitude absolue sur la concentration de la solution fournie de bleu patenté de concentration $c_i = 1{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$ est déduite du nombre de chiffres significatifs exprimés dans l'énoncé :

$$\Delta c_i = 5.10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}.$$

L'incertitude relative sur la concentration de la solution finale est donc :

$$\frac{\Delta c_f}{c_f} = \frac{\Delta c_i}{c_i} + \frac{\Delta V_f}{V_f} + \frac{\Delta V_i}{V_i}$$

soit $\dfrac{\Delta c_f}{c_f} = \dfrac{5.10^{-5}}{1{,}0.10^{-3}} + \dfrac{0{,}2}{500} + \dfrac{0{,}02}{5} = 0{,}05.$

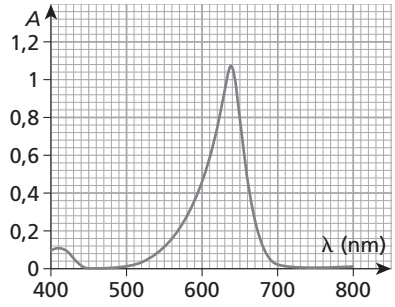
Du fait de la dilution de la solution initiale d'un facteur 100 :

$$c_f = \frac{c_i}{100} = 1{,}00.10^{-5} \text{ mol.L}^{-1}.$$

D'où $\Delta c_f = 0{,}05 \times 1{,}00.10^{-5} = 5.10^{-7}$ mol.L$^{-1}$.

Donc $c_f = \dfrac{c_i}{100} = (1{,}00 \pm 0{,}05).10^{-5}$ mol.L$^{-1}$.

Le spectre d'absorption obtenu est le suivant :




**d.** On repère un maximum d'absorption à $\lambda_{max} = 640$ nm, pour lequel $A_{640} = 1{,}08$.
Les caractéristiques spectroscopiques du bleu patenté se déduisent de la loi de Beer-Lambert.

Sachant que $A_{640} = \varepsilon_{640}\,\ell\,c$ alors $\varepsilon_{640} = \dfrac{A_{640}}{\ell c}$.

$$\varepsilon_{640} = \frac{1{,}08}{1{,}0 \times 1{,}0.10^{-5}} = 1{,}1.10^5 \text{ L.mol}^{-1}\text{cm}^{-1}.$$

**e.** La tartrazine (**Fig. 9** p. 110) a un maximum d'absorption à $\lambda_{max} = 420$ nm, pour lequel $A_{430} = 1{,}02$. Les caractéristiques spectroscopiques de la tartrazine se déduisent de la loi de Beer-Lambert :

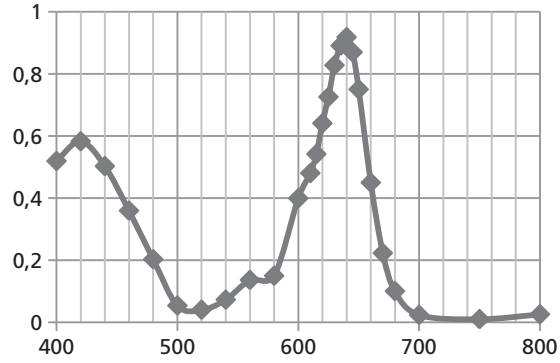
sachant que $A_{420} = \varepsilon_{420}\,\ell\,c$ alors $\varepsilon_{420} = \dfrac{A_{420}}{\ell c}$.

$$\varepsilon_{430} = \frac{1{,}02}{1{,}0 \times 4{,}0.10^{-5}} = 2{,}6.10^4 \text{ L.mol}^{-1}\text{cm}^{-1}.$$

**f.** Il suffit de vérifier que la ou les absorbances maximales du spectre ne dépassent pas les limites de l'appareil utilisé. Le sirop de menthe étant une solution contenant du bleu patenté et de la tartrazine, son spectre possède deux d'absorption, aux longueurs d'onde 420 nm et 640 nm.

**g.** Si la valeur maximale de l'absorbance est supérieure à la limite, il faut diluer de façon connue la solution analysée. Cette opération nécessite une pipette jaugée et une fiole jaugée.

**i.** Le spectre d'absorption UV d'une solution de sirop de menthe dilué dix fois a été enregistré :




Les deux maxima d'absorption apparaissent pour les longueurs d'onde 420 et 640 nm, ce qui est bien en accord avec la présence des deux colorants, E131 et E102.

**k.** Les concentrations en colorant sont déduites des absorbances aux maxima et des valeurs des coefficients d'absorption molaires *via* la loi de Beer-Lambert.
Pour le bleu patenté : $\lambda_{max} = 640$ nm et $A_{640} = 0{,}92$.

$$c_{\text{bleu patenté}} = \frac{A_{640}}{\ell\,\varepsilon_{640}}$$

$$c_{\text{bleu patenté}} = \frac{0{,}92}{1{,}0 \times 1{,}1.10^5} = 8{,}36.10^{-6} \text{ mol.L}^{-1}.$$

Pour la tartrazine : $\lambda_{max} = 420$ nm et $A_{420} = 0{,}58$

$$c_{tartrazine} = \frac{A_{420}}{\ell \times \varepsilon_{420}}$$

$$c_{tartrazine} = \frac{0{,}58}{1{,}0 \times 2{,}6.10^{4}} = 2{,}23.10^{-5} \text{mol.L}^{-1}$$

***Commentaires***

• Les limites des spectrophotomètres vont de 1,5 à 3 selon leur performance.

• Pour la question **g.** sur les essais effectués, une dilution du sirop de menthe d'un facteur dix a été suffisante.

# Exercices

## Applications

### 1 Groupes caractéristiques

**a.**

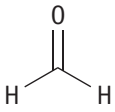
• Pour un aldéhyde : carbonyle (fin de chaine) —CHO.

• Pour une cétone : carbonyle (milieu de chaine) —CO—.

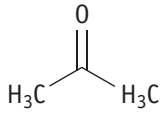
• Pour une amine : amino $—NH_2$ —NH— ou N (lié à trois atomes de carbone).

**b.**

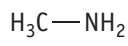
• Aldéhyde :



• Cétone :



• Amine :



### 2 Nomenclature

**a.** et **b.**

• Acide carboxylique : X = OH.

• Ester : $X = OCH_3$.

• Amide : $X = NHCH_3$.

• Ester : $X = OC_2H_5$.

### 3 Chaîne carbonée

**a.** 3, **b.** 4, **c.** 6, **d.** 1.

### 4 Nomenclature des alcanes

**a.** Pentane.

**b.** Heptane.

**c.** Méthane.

### 5 Spectre du carotène

**a.** Le spectre se trouve principalement dans le visible. Une petite partie cependant est dans l'UV (350 à 400 nm).

**b.** Le maximum d'absorption est à $\lambda_{max} = 450$ nm.

**c.** $\lambda_{max} = 450$ nm correspond à du bleu (couleur absorbée). La couleur de la solution est la couleur complémentaire, soit de l'orange.

Cette couleur était prévisible : le carotène tient son nom de la carotte.

**d.** La grandeur en ordonnée est l'absorbance. Elle peut dépasser 1.

**e.** La transmittance aurait pu être utilisée à la place de l'absorbance. Sa valeur varie de 0 à 1.

### 6 Spectre d'un extrait d'une plante

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 7 Caractérisation d'un aldéhyde

**a.** Il s'agit d'une spectroscopie UV-visible car le spectre est enregistré entre 200 et 500 nm.

**b.**

| Longueur d'onde | Absorbance | Coefficient d'absorption molaire |
|---|---|---|
| $\lambda = 255$ nm | $A_{255} = 0{,}19$ | $\varepsilon_{255} = \frac{A_{255}}{\ell c}$ <br> $\varepsilon_{255} = \frac{0{,}19}{1{,}0 \times 1{,}42.10^{-5}}$ <br> $= 1{,}3.10^{4}$ L.mol$^{-1}$.cm$^{-1}$ |
| $\lambda = 395$ nm | $A_{395} = 0{,}49$ | $\varepsilon_{395} = \frac{A_{395}}{\ell c}$ <br> $\varepsilon_{395} = \frac{0{,}49}{1{,}0 \times 1{,}42.10^{-5}}$ <br> $= 3{,}5.10^{4}$ L.mol$^{-1}$.cm$^{-1}$ |

### 8 Couleur de l'hélianthine

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 9 Spectre à compléter

**a.** Si l'abscisse est en cm$^{-1}$, il s'agit de nombres d'onde. La valeur de ces derniers varie de 1 500 à 4 000. Il s'agit donc d'une spectroscopie infrarouge.

**b.** Il s'agit de la transmittance.

**c.** Il n'y a aucune absorption entre 3 200 et 3 700 cm$^{-1}$. Le groupe hydroxyle n'est donc pas présent sur cette molécule, qui en conséquence ne peut pas être un alcool.

### 10 Recherche d'un groupe caractéristique en IR

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 11 Déplacements chimiques

**a.** Les trois signaux ont pour déplacements chimiques respectifs : 2,1 ; 2,7 et 3,8 ppm.

**b.** L'unité, ppm, signifie partie par million.

*Remarque* : le ppm est une unité sans dimension car le déplacement chimique est défini comme le rapport de deux fréquences (voir le paragraphe 3.3 du cours p. 116).

### 12 Nombre de signaux sur un spectre RMN

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

## Entraînement

### 13 Chlorophylle A

**a.** La chlorophylle A absorbe à 430 nm et à 660 nm.

**b.** La solution absorbe à deux longueurs d'onde, 450 nm et 665 nm. Si elle n'absorbait qu'à 450 nm, la solution serait jaune, et si elle n'absorbait qu'à 665 nm, elle serait bleue. Dans le cadre de la synthèse soustractive des couleurs (vu en Première S), l'œil perçoit donc la lumière issue de la solution comme étant verte.

**c.** La loi de Berr-Lambert est : $A = \varepsilon \ell c$ où $A$ est l'absorbance de l'échantillon (sans unité), $\varepsilon$ le coefficient d'absorption molaire de l'espèce chimique, $\ell$ la longueur de l'échantillon (en centimètres) et $c$ la concentration molaire de l'espèce analysée (en moles par litre).

**d.** Unité du coefficient d'absorption molaire $\varepsilon$ : $L.mol^{-1}.cm^{-1}$.

**e.** À 434 nm, l'absorbance est $A_{434} = 0{,}76$. D'après la loi de Berr-Lambert :

$$c = \frac{A_{434}}{\ell \varepsilon_{434}}$$

$$c = \frac{0{,}76}{1{,}0 \times 1{,}11.10^{5}} = 6{,}8.10^{-6}\ mol.L^{-1}.$$

### 14 Spectre infrarouge

**a.** Les nombres d'onde suivants sont repérés sur le spectre (en s'aidant éventuellement d'un décimètre).

| Nombres d'onde des absorptions caractéristiques ($cm^{-1}$) | Liaisons chimiques correspondantes (voir fig. 8 p. 113) |
|---|---|
| 2 880, 2 960, 2 740 et 2 810 | C—H |
| 1 695 | C=O |

**b.** Le butanal possède un unique groupe caractéristique (un carbonyle fin de chaîne), repérable en spectroscopie IR par les absorptions suivantes (**fig. 9** p. 114) : 1 650 – 1 730 $cm^{-1}$ (C=O) et 2 750 – 2 900 $cm^{-1}$ ($C_{ald}$—H).

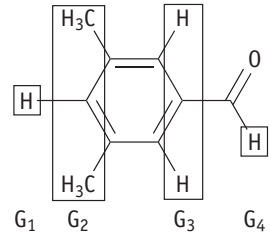
Cette description est cohérente avec le spectre, qui peut donc être celui du butanal.

### 15 Synthèse du paracétamol

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 16 Aldéhyde aromatique

**a.**




**b.** et **c.** L'attribution est effectuée en utilisant la méthode développée dans l'activité 3 p. 109.

On utilise, dans un premier temps, le signal intégral puis la valeur des déplacements chimiques.

| Groupe de protons équivalents | Nombre de protons du groupe | Déplacement chimique du signal RMN associé | Justification |
|---|---|---|---|
| $G_2$ | 6 | 2,3 ppm | C'est le seul groupe dont l'intégrale du signal corresponde à 6 H |
| $G_3$ | 2 | 7,4 ppm | C'est le seul groupe dont l'intégrale du signal corresponde à 2 H |
| $G_4$ | 1 | 9,8 ppm | La valeur du déplacement chimique est caractéristique d'un proton aldéhydique |
| $G_1$ | 1 | 7,6 ppm | Par élimination, le signal à 7,6 ppm correspond à $G_1$ |

### 17 Spectre RMN de l'isobutanol

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

## Approfondissement

### 18 Attribution d'un spectre IR à une molécule

**a.**

| Formule semi-développée | Formule brute | Nom du groupe caractéristique | Nom de la molécule | Caractéristiques spectroscopiques en IR |
|---|---|---|---|---|
| $CH_3CH_2CH=CH_2$ | $C_4H_8$ | double liaison C=C | But-1-ène | C=C : 1 625 – 1 685 $cm^{-1}$<br>$C_{ène}$—H : 3 000 – 3 100 $cm^{-1}$ |
| $CH_3CH_2CH_2CH_2OH$ | $C_4H_{10}O$ | hydroxyle | Butan-1-ol | O—H alcool libre : 3 580 – 3 670 $cm^{-1}$<br>O—H alcool lié : 3 200 – 3 400 $cm^{-1}$ |
| $CH_3CH_2CH_2C(=O)-OH$ | $C_4H_8O_2$ | carboxyle (fin de chaîne) | Acide butanoïque | O—H : 3 200 – 3 400 $cm^{-1}$<br>C=O : 1 680 – 1 710 $cm^{-1}$ |
| $H_2C=CHCH_2CH_2OH$ | $C_4H_8O$ | hydroxyle et double liaison C=C | But-3-ène-1-ol | C=C : 1 625 – 1 685 $cm^{-1}$<br>$C_{ène}$—H : 3 000 – 3 100 $cm^{-1}$<br>O—H alcool libre : 3 580 – 3 670 $cm^{-1}$<br>O—H alcool lié : 3 200 – 3 400 $cm^{-1}$ |

**b.** On n'observe qu'une unique absorption caractéristique à 3 450 $cm^{-1}$ : c'est celle du groupe hydroxyle. Le spectre est donc celui du butan-1-ol

### 19 Déplacement chimique en RMN et électronégativité

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 20 Protons équivalents en RMN

**a.** Le 2-méthoxyacétonitrile possède deux groupes de protons équivalents.

**b.** Son spectre présente donc deux signaux

**c.** le $CH_3$ et le $CH_2$ sont séparés par un atome d'oxygène. Les H n'ont donc aucun voisin et leurs signaux RMN sont des singulets.

**d.** Le $CH_3$ est proche d'un atome électronégatif (O) alors que le $CH_2$ est entouré de deux groupes électroattracteurs (O et CN). Le signal associé au $CH_2$ a donc un déplacement chimique plus important.

On peut donc proposer un spectre constitué de deux singulet, l'un d'intégration 3 et l'autre d'intégration 2 situé plus à sa gauche.

*Remarque* : Le spectre est le suivant :

### 21 Oxydation de l'acide benzoïque

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 22 Suivi d'une réaction par spectroscopie IR

**a.** 2,4-diméthylpent-2-ène.

**b.**

| Molécule | Nom | Groupe caractéristique détectable en IR |
|---|---|---|
| 2 | 2-méthylpropanal | Carbonyle (fin de chaîne) C=O : 1 650 – 1 730 $cm^{-1}$<br>$C_{ald}$—H : 2 700 – 2 900 $cm^{-1}$ (deux bandes) |
| 3 | Propanone ou acétone | Carbonyle (milieu de chaîne) C=O : 1 650 – 1 730 $cm^{-1}$ |

**c.** Bandes d'absorption caractéristiques d'un alcène :
C=C : 1 625-1 685 $cm^{-1}$ ;
$C_{ène}$—H : 3 000 – 3 100 $cm^{-1}$.
Ces bandes sont bien présentes sur le spectre du réactif 1 à 3 040 $cm^{-1}$ ($C_{ène}$—H) et à 1 650 $cm^{-1}$ (C=C).

**d.** Bandes d'absorption caractéristiques d'un aldéhyde :
C=O : 1 650 – 1 730 $cm^{-1}$
et $C_{ald}$—H : 2 750 – 2 900 $cm^{-1}$ (deux bandes).
Bande d'absorption caractéristique d'une cétone :
C=O (1 650 – 1 730 $cm^{-1}$).

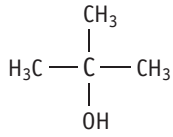
**e.**

| Fraction | Absorptions repérées sur le spectre |
|---|---|
| A | 1 710 $cm^{-1}$ |
| B | 1 710 $cm^{-1}$ ; 2 750 et 2 840 $cm^{-1}$ |

**f.** On repère pour la fraction B les deux bandes caractéristiques de $C_{ald}$—H. La fraction B contient donc la molécule 2. Le spectre IR de la fraction A présentant une absorption caractéristique de la fonction carbonyle, il s'agit de la molécule 3.

### 23 Liaisons hydrogène en IR

**a.**



2-méthylpropan-2-ol

**b.** Le groupe caractéristique hydroxyle est bien visible en spectroscopie IR.

**c.** On observe une absorption intense et large à 3 370 $cm^{-1}$. Cette dernière est caractéristique d'un groupe hydroxyle engagé dans une liaison hydrogène.

**d.** La même molécule, diluée dans du $CCl_4$, conduit à un spectre présentant une absorption fine à 3 620 $cm^{-1}$ ce qui signifie que le groupe hydroxyle n'est cette fois plus engagé dans une liaison hydrogène. En effet, en milieu dilué, les molécules de 2-méthylpropan-2-ol sont trop éloignées les unes des autres pour établir des liaisons hydrogène.

**e.** Pour l'acide hexanoïque en solution dans le CCl4, on s'attend à voir, comme précédemment, une absorption fine autour de 3 600 $cm^{-1}$ (liaison OH non impliquée dans une liaison hydrogène). Cette prévision n'est pas en accord avec le spectre de la **figure 3** p. 130.

**f.** Le spectre de l'acide hexanoïque montre qu'il existe des liaisons hydrogène même en milieu dilué. Cette constatation expérimentale est cohérente avec la structure dimérique de l'acide hexanoïque.

## Exercices de BAC

### 24 Extraction de la vanilline

**1.a.** L'intérêt est d'extraire les molécules organiques et de les séparer des molécules hydrosolubles, notamment le saccharose qui compose la majorité du sucre vanillé.

**b.** Le sucre vanillé contient bien de la vanilline (ainsi qu'une autre molécule dont le rapport frontal est 0,1) mais ne contient pas d'éthylvanilline.

**2.a.** La vanilline n'absorbe que dans l'UV. Elle est donc incolore.

**b.** Il s'agit de la loi de Beer-Lambert $A = \varepsilon \ell c$.

**c.** On mesure l'absorbance à son maximum de façon à avoir une mesure le plus précise possible. D'une part, pour une incertitude absolue $\Delta A$ constante quel que soit $\lambda$, plus l'absorbance $A$ est élevée, plus l'incertitude relative $\frac{\Delta A}{A}$ est faible. D'autre part, la tangente à la courbe $A = f(\lambda)$ étant horizontale, une petite variation sur la longueur d'onde a moins d'influence sur la détermination de $A$ que si la longueur d'onde choisie se trouvait dans la partie la plus pentue de la courbe.

**d.** la quantité de vanilline $n_1$ présente dans $F_1$ peut s'écrire :

$$n_1 = c_1 V_1 = \frac{m}{M} \times \frac{V_2}{V_0}$$

Donc $$c_1 = \frac{m}{M} \times \frac{V_2}{V_0} \times \frac{1}{V_1}$$

**e.**

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{0{,}1}{100} = 1.10^{-3}$$

$$\frac{\Delta V_0}{V_0} = \frac{0{,}4}{1000} = 4.10^{-4}$$

$$\frac{\Delta V_1}{V_1} = \frac{0{,}1}{100} = 1.10^{-3}$$

$$\frac{\Delta V_2}{V_2} = \frac{0{,}007}{1} = 7.10^{-3}$$

La principale source d'incertitude sur la concentration de la solution $F_1$ est la mesure du volume $V_2$.

**f.** D'après la question **d.**,

$$c_1 = \frac{100.10^{-3}}{152{,}2} \times \frac{1.10^{-3}}{1} \times \frac{1}{100.10^{-3}} = 6{,}5703.10^{-6}\ \text{mol.L}^{-1}$$

(On attend de calculer $\Delta c_1$ pour connaître le nombre de chiffres significatifs de $c_1$.)

D'après la question **e.**,

$$\frac{\Delta c_1}{c_1} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta V_0}{V_0} + \frac{\Delta V_1}{V_1} + \frac{\Delta V_2}{V_2}$$

$$\frac{\Delta c_1}{c_1} = 1.10^{-3} + 4.10^{-4} + 1.10^{-3} + 7.10^{-3} = 9{,}4.10^{-3}$$

On en déduit :

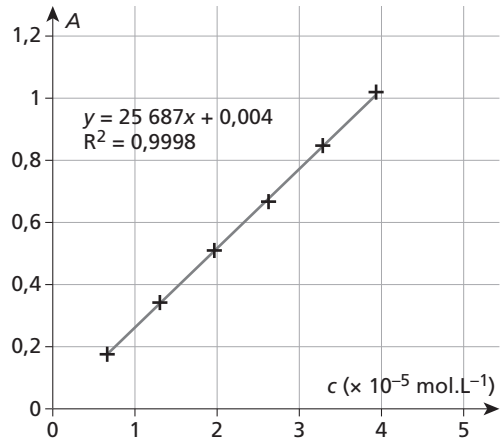
$$\Delta c_1 = 9{,}4.10^{-3} \times c_1 = 6.10^{-8}\ \text{mol.L}^{-1}$$

$$c_1 = (6{,}57 \pm 0{,}06).10^{-6}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**g.** D'après la loi de Beer-Lambert, $A = \varepsilon \ell c$, le coefficient d'absorption molaire $\varepsilon_{348}$ de la vanilline à 348 nm est le coefficient directeur du tracé de $A$ en fonction de $\ell c$ (avec $\ell = 1{,}0\,\text{cm}$).

D'après le tracé ci-dessous, on a :

$$\varepsilon = 2{,}57.10^4\,\text{L.mol}^{-1}\text{cm}^{-1}.$$




Absorbance à 348 nm d'un échantillon de vanilline en fonction de sa concentration.

**h.** La concentration $c$ de la solution est déduite du spectre UV-visible : à 348 nm, on mesure $A_{348} = 0{,}275$. On en déduit :

$$c = \frac{A}{\varepsilon \ell}$$

$$c = \frac{0{,}275}{2{,}57.10^4 \times 1{,}0} = 1{,}1.10^{-5}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

On peut résumer les résultats dans un tableau comme le suivant :

| | Dans 1,000 g de sucre vanillé | Dans un sachet de 7,5 g de sucre vanillé |
|---|---|---|
| Quantité de matière de vanilline | $n = cV_5$<br>$n = 1{,}1.10^{-5} \times 500.10^{-3}$<br>$= 5{,}5.10^{-6}\,\text{mol}$ | $n' = \frac{n \times 7{,}5}{1}$<br>$n' = 4{,}1.10^{-5}\,\text{mol}$ |
| Masse de vanilline | $m = nM$<br>$m = 5{,}5.10^{-6} \times 152{,}2$<br>$= 8{,}4.10^{-4}\,\text{g}$ | $m' = \frac{m \times 7{,}5}{1}$<br>$m' = 6{,}3.10^{-3}\,\text{g}$ |

## Rédiger une synthèse de documents

### 25 La RMN et l'IRM

*Analyse de la question*

La question suggère que le texte attendu présente les similitudes, puis les différences entre les deux techniques. Ces dernières s'intéressent à l'étude de protons à l'aide d'une onde radio (fréquence de l'ordre de la centaine de MHz) et nécessitent l'utilisation d'un champ magnétique. La RMN permet de mieux connaître l'environnement chimique des protons au sein d'une molécule et donne donc accès à des informations structurales concernant la molécule. L'IRM permet quant à elle un repérage des protons des molécules d'eau uniquement. Cependant, ce repérage n'est plus limité à la molécule : il est spatial et permet ainsi de cartographier des zones du corps humain.

*Pistes de réponses et mots-clés*

| Acronyme | RMN | IRM |
|---|---|---|
| Nom | Résonance **Magnétique** Nucléaire | Imagerie par Résonance **Magnétique** |
| Onde utilisée | • fréquence de l'ordre de la centaine de MHz<br>• **longueur d'onde de l'ordre du mètre** | |
| Domaine d'utilisation | **médecine** | chimie **analytique** |
| Type de protons repérés | **protons** des **molécules** présentes dans l'échantillon étudié | **protons** des **molécules d'eau** |
| Type de repérage | au sein d'une molécule | spatial |
| Information obtenue | **structure** d'une molécule | **cartographie** de zones du corps |

## 26 L'IRM et la TEP

*Analyse de la question*

La question suggère d'axer l'exposé sur les différences entre l'IRM et la TEP à l'aide du document 2. Le document 1 sert à introduire l'IRM, si l'exercice n° 25 n'a pas été traité.

*Pistes de réponses et mots-clés*

| Acronyme | TEP | IRM |
|---|---|---|
| Nom | Tomographie par Émission de Positons | Imagerie par Résonance Magnétique |
| Aspects techniques favorables à l'IRMf | • notion d'**invasion**<br>• **résolution** spatiale et temporelle<br>• **instrumentation** (proximité d'un cyclotron pour la TEP)<br>• durée de l'examen | |
| Aspects humains favorables à l'IRMf | • **durée** de l'examen<br>• **répétitivité** | |
| Aspects techniques favorables à la TEP | **incompatibilité** de l'IRM avec le métal | |
| Aspects humains favorables à la TEP | **immobilité** pour l'IRM | |

Chapitre 5

# Les outils de la mécanique classique

## Introduction au chapitre (p. 137)

Ce chapitre présente l'ensemble des outils dont l'élève de Terminale S a besoin pour traiter les problèmes de dynamiques figurant au programme : mouvements dans un champ uniforme, propulsion à réaction, mouvements de satellites. Ces problèmes sont développés dans les chapitres 6 et 7.

Ce chapitre n'aborde pas, en revanche, l'énergétique, qui est l'objet du chapitre 8 prolongé par le chapitre 9, ni la relativité restreinte, étudiée au chapitre 10.

Dans un contexte où les élèves ne savent quasiment rien des lois de la mécanique, hormis ce qui a été vu en Seconde et qui est déjà probablement loin dans les mémoires, le choix a été fait de fournir ces outils de manière complète mais efficace. Le cours sera donc utilement complété par les nombreux exercices proposés si le professeur estime qu'un travail approfondi de certains types de raisonnements est nécessaire. Les exercices du chapitre n'empiètent pas sur les thèmes développés plus particulièrement dans les chapitres 6 et 7.

Le contenu du cours proposé peut paraître dépasser les compétences exigibles définies dans le programme. En réalité, le cours contient les notions strictement nécessaires à l'acquisition de ces compétences telles que le programme l'attend. L'expression de l'accélération dans le repère de Frenet, par exemple, n'est pas mentionnée dans le programme mais est nécessaire à la démonstration de l'uniformité du mouvement circulaire d'un satellite (chapitre 7).

La présentation mathématique du cours est le reflet de la rigueur technique indispensable à la résolution d'un problème de mécanique. La lecture du cours doit donc être accompagnée de celle de la fiche-méthode n° 4 page 608, précisant notamment le parallèle entre les notations utilisées en mathématiques, comme $f'(x)$, et les notations utilisées en physique, comme $\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}(t)$.

L'ambition de ce chapitre est également de prendre du recul avec le caractère formaliste de la mécanique, pour en comprendre le sens profond. Compte tenu du fait que les élèves doivent apprendre une part énorme de la mécanique en une durée très réduite, ceci est difficile. L'activité 2, ainsi que plusieurs exercices, vont néanmoins dans ce sens.

## Activités

### 1 Descriptions cinématiques (p. 138)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

#### *Objectif*

Cette activité permet de reconnaître les quatre mouvements indiqués par le bulletin officiel : mouvement rectiligne uniforme et uniformément varié ; mouvement circulaire uniforme et non uniforme.

Ces quatre situations cinématiques sont illustrées de manières différentes : représentation graphique de la vitesse ou de la position en fonction du temps et chronophotographie de mouvement circulaire avec représentation des vecteurs vitesse à différentes dates. L'élève doit donc savoir exploiter ces documents afin de leur associer un type de mouvement.

Dans un deuxième temps, l'élève doit donner les caractéristiques du vecteur accélération selon la nature du mouvement.

#### *Correspondance avec le programme*

- Description du mouvement d'un point au cours du temps : vecteurs vitesse et accélération.
- Définir et reconnaître des mouvements (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément varié, circulaire uniforme, circulaire non uniforme) et donner dans chaque cas les caractéristiques du vecteur accélération.

### *Corrigé*

**a.** ① La trajectoire est une droite.

D'après la chronophotographie, la distance parcourue entre deux positions successives de la goutte est constante pendant des durées égales : la vitesse de la goutte est donc constante.

Il s'agit donc d'un **mouvement rectiligne et uniforme**.

② La trajectoire est une portion de cercle : le mouvement est donc circulaire. Les positions de la Terre, à intervalles de temps réguliers, sont séparées de la même distance : la vitesse est donc constante.

Il s'agit donc d'un **mouvement circulaire et uniforme**.

③ La trajectoire est une portion de cercle : le mouvement est donc circulaire.

L'écart entre les points pris à intervalles de temps réguliers augmente lors du mouvement, donc la vitesse augmente.

Il s'agit donc d'un **mouvement circulaire et accéléré**.

④ La trajectoire est une droite : le mouvement est donc rectiligne.

Le graphique $x = f(t)$ est modélisable par une fonction parabolique du type $x = kt^2$. La dérivée première de cette fonction donne l'expression de la vitesse : $v = 2kt$ qui n'est pas une constante.

L'expression de l'accélération s'obtient en dérivant de nouveau : $a = 2k$.

La valeur de l'accélération est donc constante.

Il s'agit donc d'un **mouvement rectiligne et uniformément accéléré**.

**b.** ① Comme le mouvement est rectiligne et uniforme, le vecteur accélération est nul.

② L'accélération est un vecteur parallèle à la direction Terre-Soleil, orienté de la Terre vers le Soleil. Sa valeur est $a = \dfrac{v^2}{r}$, où $v$ est la vitesse de la Terre dans le référentiel héliocentrique et $r$ la distance Terre-Soleil.

Sur le dessin, 5,1 cm représentent deux fois la distance Terre-Soleil, donc $3{,}0.10^{11}$ m. Deux positions successives de la Terre sont séparées de 4 mm sur le dessin, correspondant à une durée de 10 jours.

La vitesse a donc pour valeur :

$$v = \frac{\dfrac{0{,}4}{5{,}1} \times 3{,}0.10^{11}}{10 \times 24 \times 3\,600} = 3.10^4 \text{ m.s}^{-1}.$$

Il s'en déduit l'accélération :

$$a = \frac{(3.10^4)^2}{1{,}5.10^{11}} = 5.10^{-3} \text{ m.s}^{-2}.$$

③ Le vecteur accélération est orienté vers l'intérieur de la trajectoire, dans une direction inconnue.

④ Le vecteur accélération est parallèle à la ligne droite du mouvement de la voiture, dirigé vers l'avant du mouvement. L'équation de la parabole présente sur le graphique est $x = 2{,}0t^2$, ce qui donne la vitesse $v = 4{,}0t$, puis $a = 4{,}0$ m.s$^{-2}$ (toutes les grandeurs sont exprimées en unités du Système international).

### *Commentaire*

Le mouvement de la Terre n'est, en réalité, pas circulaire et uniforme, mais elliptique et à vitesse variable. Toutefois, l'excentricité de l'ellipse est suffisamment faible pour que la différence ne soit pas visible sur un schéma de cette taille.

## 2 De Galilée à Newton (p. 139)

### *Objectif*

À partir de l'extrait d'un texte de Galilée, les élèves sont amenés à prendre conscience de l'équivalence de l'état de repos et de mouvement rectiligne et uniforme. L'énoncé historique de la première loi de Newton est également donné : il permet de définir une classe particulière de référentiels (les référentiels « *galiléens* »).

Cette activité mentionne aussi que le texte de Galilée relève d'une expérience de pensée, qui est une démarche fréquemment utilisée par les scientifiques.

Cette approche historique de la première loi de Newton nous a semblé pertinente car elle permet de mieux comprendre son énoncé moderne et en quoi elle définit les référentiels galiléens.

### *Correspondance avec le programme*

- Description du mouvement d'un point au cours du temps ; référentiel galiléen ; principe d'inertie.
- Choisir un référentiel d'étude.

### *Corrigé*

**a.** Pour Galilée, les sens ne suffisent pas pour distinguer l'état de mouvement (rectiligne et) uniforme de l'état de repos dans le référentiel terrestre. Le navire est donc équivalent à un référentiel à l'arrêt.

**b.** Cette équivalence de référentiel n'est valable pour des référentiels en translation rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre. La différence est perceptible si le référentiel est en mouvement circulaire ou accéléré, comme par exemple dans une voiture qui freine ou tourne.

**c.** Chaque goutte d'eau en chute est soumise uniquement à l'action attractive de la Terre : d'après le principe d'inertie, dans le référentiel du navire, la goutte d'eau ne peut donc être ni au repos, ni en mouvement rectiligne et uniforme. C'est ce que Newton écrit : une force agit sur la goutte d'eau et la contraint à changer d'état.

**d.** En revanche, dans le référentiel de la goutte d'eau, cette dernière est immobile alors qu'elle reste soumise à la seule action de la Terre : l'énoncé de Newton semble ne pas s'appliquer ici. En fait, la première loi de Newton définit un type de référentiel dans lequel l'état de repos ou de mouvement rectiligne et uniforme d'un objet s'interprète par l'absence de forces sur cet objet (ou par des forces qui se compensent). Tous les référentiels en mouvement rectiligne et uniforme par rapport à ce type de référentiel appartiennent à la même famille : celle des référentiels galiléens.

Ils sont appelés ainsi car Galilée spécifie l'équivalence de ces référentiels, alors que Newton ne spécifie pas dans l'énoncé de sa loi dans quel référentiel l'étude du mouvement est valable.

**e.** Dans l'énoncé moderne de la première loi de Newton, il n'est plus question du fait qu'une force fait changer l'état cinématique d'un objet. Cette notion se retrouve dans la deuxième loi de Newton.

### *Commentaires*

Il est à noter que le principe de la relativité de Galilée ne met pas en avant le caractère **rectiligne** des translations de référentiels en mouvement uniforme les uns par rapport aux autres pour que les lois du mouvement restent les mêmes. Il est intéressant de souligner que, pour Galilée, tout mouvement uniforme ne pouvait être que circulaire. Il était capable de concevoir un mouvement uniforme en ligne droite mais, pour lui, un tel mouvement n'existe pas dans la nature ; c'est une vue de l'esprit.

Ainsi, pour Galilée, le mouvement du navire est uniforme car sa vitesse est constante et sa trajectoire est un arc de cercle du globe terrestre.

Le principe de la relativité de Galilée a été par la suite formulé par :

• Newton sans pour autant préciser la notion de référentiel : *« Les mouvements relatifs des corps enfermés dans un espace quelconque sont les mêmes que cet espace soit immobile, ou qu'il se meuve le long d'une ligne droite, sans rotation »*.

• Einstein faisant appel à la notion de référentiel (1905) : *« Étant donné deux référentiels en translation uniforme l'un par rapport à l'autre, les lois auxquelles sont soumis les changements d'état des systèmes physiques restent les mêmes, quel que soit le référentiel auquel ces changements sont rapportés »*.

**c.** Il serait intéressant d'inviter les élèves à décrire la chute des gouttes d'eau si le navire accéléré par exemple et de confronter cette description à l'application du principe d'inertie. L'activité replace le texte de Galilée dans un registre d'expérience de pensée. Un autre exemple d'expérience de pensée de Galilée peut être rappelé à cette occasion : l'étude de la chute des corps de masses différentes.

Dans son ouvrage, *Galilée et Einstein*, la physicienne Françoise Balibar présente le parcours de ces personnages qui ont révolutionné l'interprétation du mouvement. Ainsi, les élèves de Terminale S trouveront, dans ce livre, une base ou un écho aux notions relatives à la mécanique vues en classe.

## 3 Équilibre d'un solide (p. 140)

### *Objectif*

Dans cette activité, l'élève est invité à étudier les conditions d'équilibre d'un solide.

Il s'agit tout d'abord d'un solide soumis à l'action de trois fils reliés à des dynamomètres ou à des masses marquées par l'intermédiaire de poulies. Le dispositif est placé sur un tableau muni d'une feuille de papier permettant de repérer les droites d'action des forces. Dans un deuxième temps, il s'agit d'une réflexion sur la pesée en termes de forces. Là encore, trois forces sont mises en jeu : poids, poussée d'Archimède, réaction de support. Cette activité est l'occasion de mettre en place des raisonnements simples, mais précis, utilisant la première et la troisième lois de Newton.

### *Correspondance avec le programme*

Connaître et exploiter les trois lois de Newton.

### *Liste du matériel (par binôme)*

• Un tableau vertical avec deux poulies.

• Un objet léger (ou simplement un anneau) auquel sont accrochés trois fils.

• Des masses marquées ou des dynamomètres adaptés.

• Une feuille A3.

• Une balance de précision (au moins le dixième de gramme).

• Un bécher 250 mL forme haute.

• De l'eau.

***Corrigé***

**a.** L'objet est soumis à trois forces (les trois tensions de fils). Comme il est immobile dans le référentiel terrestre supposé galiléen, la somme vectorielle de ces trois forces est nulle.

**b.** Si la construction vectorielle est effectuée de manière soignée, la somme vectorielle de deux des trois tensions est égale à l'opposé de la troisième.

**c.** Dans la situation ①, l'objet est soumis à deux forces : son poids $\vec{P_1} = m_1\vec{g}$ et la réaction du support $\vec{R_1}$. L'objet étant immobile dans le référentiel terrestre supposé galiléen, la première loi de Newton s'écrit $\vec{P_1} + \vec{R_1} = \vec{0}$, ce qui donne $\vec{R_1} = -\vec{P}$. D'après la troisième loi de Newton, la force $\vec{F_1}$ exercée par l'objet sur le plateau est l'opposé de la force exercée par le plateau sur l'objet : on a donc $\vec{F_1} = -\vec{R_1}$, et par conséquent $\vec{F_1} = \vec{P_1}$. La valeur de cette force est $F_1 = m_1 g$ : la masse $m_1$ affichée par la balance est donc bien la masse de l'objet. Le même raisonnement s'applique à l'identique dans le cas de la situation ② pour le bécher rempli d'eau.

**d.** Le système {bécher + eau} subit la réaction du support $\vec{R_3}$. D'après la troisième loi de Newton, elle est égale à l'opposé de la force exercée par le bécher sur la balance, $\vec{F_3}$. Cette force a pour valeur $F_3 = m_3 g$ par définition de l'affichage de la balance. Elle est verticale et vers le bas, donc $\vec{F_3} = m_3\vec{g}$. Par conséquent, $\vec{R_3} = -m_3\vec{g}$.

**e.** Le système {bécher + eau} subit également la force $\vec{F}_{\text{obj}}$ exercée sur l'eau par l'objet immergé. D'après la troisième loi de Newton, c'est l'opposé de la force exercée par l'eau sur l'objet immergé, qui est poussée d'Archimède $\vec{\Pi}$ subie par l'objet. Cette force est verticale et vers le haut, de valeur $\rho_0 Vg$, donc la force exercée par l'objet sur le système {bécher + eau} est verticale, vers le bas, de valeur $\rho_0 Vg$.

**f.** En outre, le système {bécher + eau} subit son poids $\vec{P_2} = m_2\vec{g}$. Ce système est immobile dans le référentiel terrestre supposé galiléen ; la première loi de Newton s'écrit $\vec{P_2} + \vec{F}_{\text{obj}} + \vec{R_3} = \vec{0}$. En reportant les expressions, cela donne la relation $m_2\vec{g} + \rho_0 V\vec{g} - m_3\vec{g} = \vec{0}$ d'où $m_2 + \rho_0 V - m_3 = 0$.

**g.** La masse de l'objet vérifie $m_1 = \rho V$, où $\rho$ est la masse volumique du métal composant l'objet. Elle s'écrit également $m_1 = d\rho_0 V$, où $d$ est la densité du métal. La relation obtenue à la question précédente permet d'écrire $\rho_0 V = m_3 - m_2$. On en déduit $m_1 = d(m_3 - m_2)$, ce qui donne bien la relation recherchée.

## 4 Mouvements rectilignes (p. 141)

***Objectif***

Cette activité expérimentale comporte deux parties indépendantes :

- une étude cinématique et dynamique d'une bille roulant sur un plan inclinée,
- une étude cinématique et dynamique de la chute d'une goutte d'une solution de permanganate de potassium dans une colonne d'huile.

La partie 1 repose sur des chronométrages.

Au travers de cette première partie, l'élève est invité à porter un regard critique sur la précision de ses mesures.

L'outil informatique est également présent : à l'aide d'un logiciel de traitement de données, l'élève doit calculer des vitesses et des accélérations.

Le choix que les vecteurs vitesse et accélération n'aient qu'une seule coordonnée (selon le plan incliné) est volontaire ici. Le but est d'initier les élèves à la notion d'accélération ainsi qu'à l'outil informatique des traitements de données.

Dans un second temps, une étude dynamique de la situation est proposée avec pour but le calcul de la force de frottements du plan incliné.

L'élève est amené à appliquer la deuxième loi de Newton (avec l'expression de l'accélération) puis à réaliser des projections de vecteurs forces ; ce qui n'est pas forcément une étape simple.

La partie 2 nécessite aussi l'usage de l'informatique.

À partir de mesures expérimentales, l'élève doit effectuer le traitement de données en vue de caractériser le vecteur accélération du point pour déterminer la valeur de la force des frottements qui s'exercent sur une goutte de permanganate de potassium en chute dans l'huile.

***Correspondance avec le programme***

- Connaître et exploiter les trois lois de Newton.
- Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier le mouvement.
- Définir et reconnaitre des mouvements (rectiligne uniforme, rectiligne uniformément varié, circulaire uniforme, circulaire non uniforme) et donner dans chaque cas les caractéristiques du vecteur accélération.

### *Liste du matériel (par binôme)*

**Pour la partie 1 :**

- Une balle de ping-pong par exemple de masse $m$ voisine de 2,7 g.
- Un plan incliné de deux mètres.
- Un chronomètre.
- Un mètre ruban de 2 m de long.
- Un ordinateur avec un logiciel de traitements de valeurs.

**Pour la partie 2 :**

- Une burette graduée contenant une solution de permanganate de potassium.
- Une éprouvette graduée de capacité 200 mL munie d'un réglet ou d'un mètre ruban.
- Une solution de permanganate de potassium.
- Une éprouvette de 10 mL.
- Un bécher de 100 mL.
- Un chronomètre.

### *Corrigé*

**1.a.** Pour améliorer la valeur estimée de $t$ pour une position donnée, il est possible de faire plusieurs fois les mesures et d'en faire une moyenne.

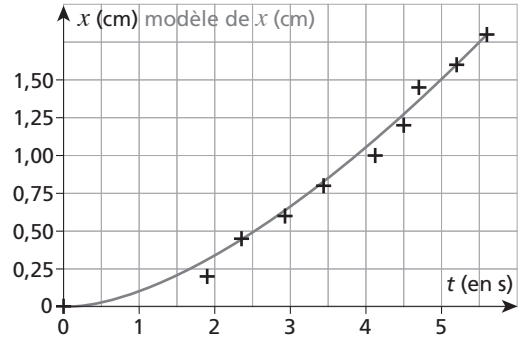
Les mesures obtenues pour un angle $\alpha = 16°$ sont regroupées dans le tableau suivant :

| $x$ (cm) | $t$ (s) |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 20 | 1,59 |
| 40 | 2,35 |
| 60 | 2,93 |
| 80 | 3,42 |
| 100 | 4,11 |
| 120 | 4,50 |
| 140 | 4,71 |
| 160 | 5,20 |
| 180 | 5,62 |

Pour les valeurs de $t$, sept mesures ont été faites pour chaque valeur de $x$ associée, et une moyenne a été calculée. L'incertitude sur la valeur de $t$ peut être estimée à 0,2 s.

L'incertitude sur $x$ est de 0,5 cm.

La représentation graphique de $x$ en fonction de $t$ obtenue avec sa modélisation est donnée par la courbe suivante :




L'équation du modèle est : $x = 60.10^{-3} \times t^2$
(car $v(t = 0) = 0$ m.s$^{-1}$ et $x(t = 0) = 0$ m).

Il s'en déduit $a = 2 \times 60.10^{-3} = 0{,}12$ m.s$^{-2}$.

**b.** Pour appliquer la deuxième loi de Newton, il faut au préalable recenser l'ensemble des forces qui s'exercent sur la bille.

Bilan des forces qui s'exercent sur la bille :

- son poids $\vec{P}$,
- la réaction normale du support $\vec{R}$,
- la force de frottements $\vec{f}$ du plan incliné.

Choisissons le même axe $(0x)$ que celui proposé sur la figure 1 de l'énoncé et un axe $(0y)$ perpendiculaire à $(0x)$ et dont l'origine 0 est confondue avec le centre de gravité de la bille à l'instant initial.

D'après la seconde loi de Newton : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = m\vec{a}$.

La projection selon $(0x)$ donne : $mg\sin\alpha - f = ma$

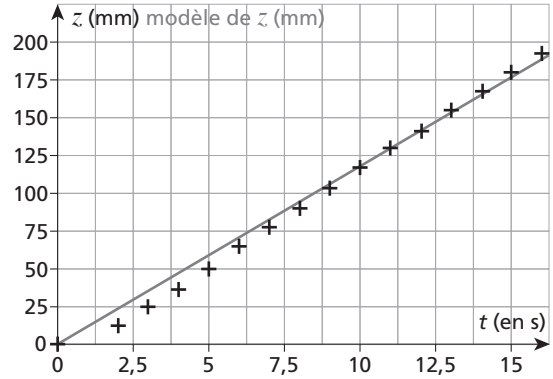
Soit $f = mg\sin\alpha - ma = m(g\sin\alpha - a)$

$= 2{,}7.10^{-3} \times (9{,}81 \times \sin(16°) - 0{,}12) = 7{,}0.10^{-3}$ N.

**2.** Pour la mesure de $V$, il suffit de compter le nombre $N$ de gouttes contenues par exemple dans 5,0 mL (volume mesuré à l'aide d'une pipette graduée). Valeur trouvée : 100 gouttes pour un volume total de 5,0 mL.

Soit $V = \dfrac{5{,}0}{100} = 5{,}0.10^{-2}$ mL $= 5{,}0.10^{-8}$ m$^3$.

La représentation graphique de $z$ en fonction de $t$ est donnée par la courbe suivante :



Modèle choisi : fonction linéaire.
Équation du modèle : $z = 11{,}9 \times t$.
On en déduit la vitesse $v = \dfrac{dz}{dt} = 11{,}9$ m.s$^{-1}$.
La vitesse étant constante, l'accélération est nulle.

**c.** Puisque $z(t)$ est une droite, la vitesse est constante. Le mouvement de la goutte est donc rectiligne et uniforme. D'après la première loi de Newton, la somme vectorielle des forces qui s'exercent sur la goutte est donc nulle.

**d.** La valeur du poids est $P = mg$ où $m$ est la masse de la goutte soit :
$P = \rho_g Vg = 1{,}0.10^3 \times 5{,}0.10^{-8} \times 9{,}81 = 4{,}9.10^{-4}$ N.
La valeur de la poussée d'Archimède est :
$\Pi = \rho_h Vg = 9{,}0.10^2 \times 5{,}0.10^{-8} \times 9{,}81 = 4{,}4.10^{-4}$ N.

**e.** D'après la première de Newton, il est possible d'écrire : $\vec{P} + \vec{\Pi} + \vec{f} = \vec{0}$.
En projection sur l'axe $(Oz)$, il vient : $P - \Pi - f = 0$ soit $f = P - \Pi = 4{,}9.10^{-4} - 4{,}4.10^{-4} = 5{,}0.10^{-5}$ N.

***Commentaires***

**Pour la partie 1 :** le plan incliné peut être un banc d'optique en U ou une grande table légèrement surélevé d'un côté, avec une règle ou une planche en bois servant de rail.
L'étude suppose implicitement que la force de frottements subie par la balle est constante, ce qui n'a rien d'automatique. Néanmoins, les modélisations valident ce modèle avec une adéquation suffisante.
**Pour la partie 2 :** en réalité le mouvement n'est pas rectiligne et uniforme, puisqu'il y a une phase d'accélération, qui n'est pas mesurable à la main (mais qui l'est à l'aide d'une vidéo). Cela se voit sur le graphe : un modèle affine rendrait mieux compte des mesures qu'un modèle linéaire.

# Exercices

## Applications

### 1 Choix d'un référentiel

**a.** Le référentiel géocentrique est adapté pour l'étude du mouvement de la Lune autour de la Terre.

**b.** Le référentiel héliocentrique est adapté pour l'étude du mouvement de Jupiter autour du Soleil.

**c.** Le référentiel terrestre est adapté pour l'étude du mouvement d'une balle lâchée verticalement.

**d.** Le référentiel terrestre est adapté pour l'étude du décollage de la fusée, puis après les premières minutes de vol de la fusée le référentiel géocentrique est plus adapté pour l'étude de son mouvement. Lorsque la fusée se déplace entre la Terre et Mars, le référentiel héliocentrique est plus alors plus adapté.

### 2 Référentiel adapté

**a.** Le référentiel héliocentrique est le plus adapté pour étudier le mouvement des planètes du système solaire.

**b.** Le référentiel jovocentrique (centré sur Jupiter) est le plus adapté pour étudier le mouvement d'Io.

**c.** Le référentiel de Titan est adapté pour étudier le mouvement de la sonde.

### 3 Référentiel galiléen ?

**a.** Le mouvement de la balle dans le référentiel terrestre est rectiligne et accéléré.

Dans le référentiel balle, la balle est immobile.

**b.** Le référentiel de la balle ne peut pas être considéré comme galiléen car il est en mouvement rectiligne et non uniforme dans le référentiel terrestre. La première loi de Newton ne s'applique pas dans ce référentiel, comme le montre la question précédente.

### 4 Mouvement et accélération

**a.** Un point en mouvement rectiligne et uniforme possède un vecteur accélération nul.

**b.** Un point en mouvement circulaire et uniforme possède un vecteur accélération constant dans le repère de Frenet.

**c.** Un point en mouvement rectiligne et uniformément varié possède un vecteur accélération constant dans le repère de cartésien.

**d.** Un point en mouvement uniforme (qu'il soit rectiligne, circulaire ou autre), a une vitesse de valeur constante.

### 5 Vecteur accélération

**a.** Pour un mouvement rectiligne et uniforme, le vecteur accélération est nul.

**b.** Pour un mouvement circulaire et uniforme, le vecteur accélération est radial et centripète.

**c.** Pour un mouvement rectiligne et accéléré, le vecteur accélération a la même direction que la trajectoire et est dans le sens du mouvement.

### 6 Décrire un mouvement

**a.** Le mouvement est rectiligne et accéléré, le vecteur accélération est parallèle au mouvement et dirigé vers l'avant de celui-ci.

**b.** Le mouvement est circulaire et uniforme, le vecteur accélération est radial et orienté vers le centre de la trajectoire.

### 7 Équation horaire

**a.** $x$ s'exprime en mètres (m), il faut donc que $6t + 2$ soit une somme de termes qui s'expriment chacun dans la même unité que $x$, en m.

2 s'exprime donc en m : il s'agit donc d'une distance.

6 s'exprime donc en $m.s^{-1}$ : il s'agit donc d'une vitesse.

**b.** Par définition, $v_x = \dfrac{dx}{dt} = 6\ m.s^{-1}$ : la vitesse est donc constante.

**c.** Le mouvement du point matériel est donc rectiligne et uniforme.

La valeur de la vitesse reste constante, elle ne change donc pas de signe : l'objet se déplace donc toujours dans le même sens.

### 8 Déterminer une équation horaire

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 9 Vitesse et accélération

**a.** Par définition, $a_x = \dfrac{dv_x}{dt}$

**b.** La représentation graphique de $v_x$ en fonction du temps est une droite passant par l'origine, modélisable par une fonction linéaire. L'accélération $a_x$ correspond au coefficient directeur de cette droite.

**c.** Graphiquement, on détermine donc :

$$a_x = \frac{0{,}20}{40.10^{-3}} = 5{,}0\ m.s^{-2}.$$

### 10 Mouvement rectiligne

**a.** Sur le dessin, le point parcourt 1,1 cm entre les positions 4 et 6, donc sa vitesse à la position 5 est :

$$v_5 = \frac{1{,}1.10^{-2} \times 2}{0{,}080} = 0{,}28\ m.s^{-1}.$$

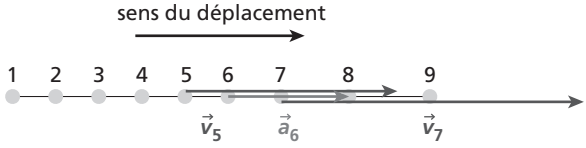
De même, sa vitesse à la position 7 est :

$$v_7 = \frac{1{,}6.10^{-2} \times 2}{0{,}080} = 0{,}40\ m.s^{-1}.$$

**b.** L'accélération à la position 6 est donc :

$$a_6 = \frac{0{,}40 - 0{,}28}{0{,}080} = 1{,}6\ m.s^{-2}.$$

*Échelle choisie :* 1 cm sur le dessin représente $1\ m.s^{-2}$.




**c.** Le mouvement est rectiligne et accéléré.

### 11 Mouvement circulaire

**a.** Sur le dessin, le point parcourt 1,5 cm entre les positions 4 et 6, donc sa vitesse à la position 5 est

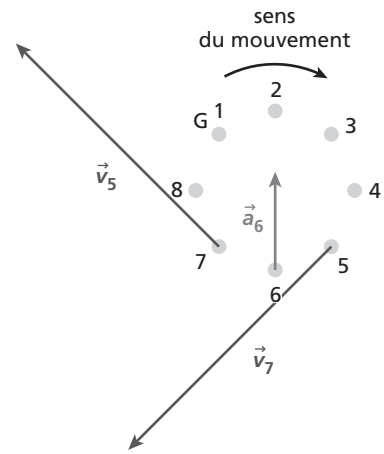
$$v_5 = \frac{1{,}5.10^{-2} \times 4}{0{,}080} = 0{,}75\ m.s^{-1}.$$

Sa vitesse à la position 7 est identique.

**b.** La vitesse a une valeur constante $v = 0{,}75\ m.s^{-1}$. Le rayon de la trajectoire circulaire est $r = 4{,}2$ cm en réalité.

L'accélération à la position 6 a donc pour valeur :

$$a_6 = \frac{v^2}{r} = 13\ m.s^{-2}.$$




**c.** Le mouvement est circulaire et uniforme.

### 12 Quantité de mouvement

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634*

### 13 Deux coureurs

**a.** La valeur de la quantité de mouvement maximale de Usain Bolt est $p = mv$. Sa vitesse maximale étant $v = 44{,}72\ km.h^{-1} = 12{,}42\ m.s^{-1}$, on calcule $p = 1{,}1.10^3\ kg.m.s^{-1}$.

**b.** La valeur de la quantité de mouvement du guépard est $p' = m'v' = 1{,}8.10^3\ kg.m.s^{-1}$.

**c.** Le guépard va deux fois plus vite qu'Usain Bolt. Sa quantité de mouvement n'est pas deux fois supérieure, car la masse d'Usain Bolt est plus grande que celle du guépard.

### 14 Livre posé sur une table

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 634.*

### 15 Ça penche

**a.** Inventaire des forces qui s'exercent sur le livre ramené à son centre d'inertie G :

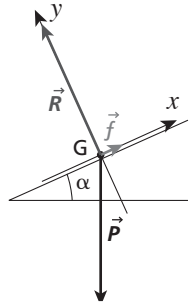
• le poids $\vec{P}$ : de direction verticale et de sens vers le bas,

• la réaction normale de la table $\vec{R}$ : de direction perpendiculaire à la surface de la table et de sens vers le haut,

• la force de frottements $\vec{f}$ : de direction tangente à la surface de la table et de sens opposé à celui de l'inclinaison de la table.

**b.** Le livre reste à l'équilibre, donc d'après la première loi de Newton :

$$\vec{P}+\vec{R}+\vec{f}=\vec{0}.$$




La projection de la première loi de Newton selon l'axe (G$x$) donne :

$$-mg\sin\alpha+0+f=0$$

soit $f=mg\sin\alpha=0{,}200\times9{,}81\times\sin(10°)=0{,}33$ N.

La projection de la première loi de Newton selon l'axe (G$y$) donne :

$$-mg\cos\alpha+R+0=0$$

soit $R=mg\cos\alpha=0{,}200\times9{,}81\times\cos(10°)=1{,}9$ N.

**c.** Voir la représentation précédente, où une flèche de 1 cm représente une force de 1 N.

## 16 Gymnaste en équilibre

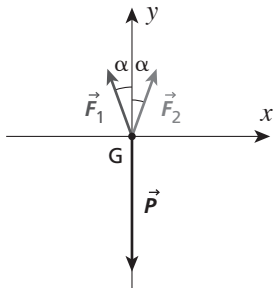
**a.** Bilan des forces qui s'exercent sur le gymnaste modélisé par son centre d'inertie G :

• son poids : $\vec{P}$,

• la force exercée par l'anneau de droite : $\vec{F}_1$,

• la force exercée par l'anneau de gauche : $\vec{F}_2$.

**b.**




**c.** $P=mg=70\times9{,}81=6{,}9.10^2$ N.

Pour déterminer les valeurs $F_1$ et $F_2$, il faut utiliser la première loi de Newton :

$$\vec{P}+\vec{F}_1+\vec{F}_2=\vec{0}.$$

Projetons cette relation selon l'axe (G$y$) :

$$-mg+F_1\cos\alpha+F_2\cos\alpha=0.$$

Or $F_1=F_2$ d'où $2F_1\cos\alpha=mg$ donc :

$$F_1=F_2=\frac{mg}{2\cos\alpha}=\frac{70\times9{,}81}{2\times\cos20}=3{,}7.10^2\text{ N}.$$

## 17 Accélération

La deuxième loi de Newton appliquée à l'objet s'écrit $m\vec{a}=\vec{F}$ où $\vec{a}$ est l'accélération de l'objet dans le référentiel d'étude supposé galiléen.

L'accélération de l'objet est donc $\vec{a}=\dfrac{\vec{F}}{m}$. Elle est verticale et vers le haut. Sa valeur est :

$$a=\frac{F}{m}=\frac{20}{0{,}200}=1{,}0.10^2\text{ m.s}^{-2}.$$

## 18 Détermination d'une force

**a.** La balle subit son poids $\vec{P}=m\vec{g}$, vertical et vers le bas, la réaction normale du support $\vec{R}$, verticale et vers le haut, les frottements $\vec{f}$ horizontaux et opposés au mouvement. On peut négliger la poussée d'Archimède ou non, peu importe.

**b.** La deuxième loi de Newton appliquée à la balle dans le référentiel terrestre supposé galiléen s'écrit $m\vec{a}=\vec{P}+\vec{R}+\vec{f}$.

**c.** En projection sur un axe horizontal, ceci donne $ma=f$, soit $f=58.10^{-3}\times0{,}080=4{,}6.10^{-3}$ N. Cette force est horizontale et opposée au mouvement.

## 19 Le livre qui glisse

**a.** Le livre subit :

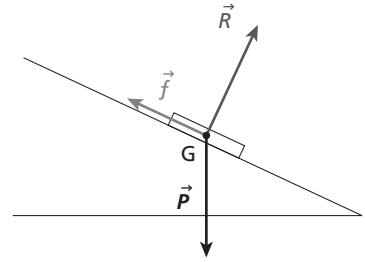
• son poids $\vec{P}=m\vec{g}$ vertical et vers le bas,

• la réaction normale du support $\vec{R}$ perpendiculaire à la table et vers le haut,

• les frottements $\vec{f}$ parallèles à la table et opposés au mouvement.

La poussée d'Archimède est négligée.

**b.**




**c.** La deuxième loi de Newton appliquée au livre dans le référentiel terrestre supposé galiléen s'écrit $m\vec{a}=\vec{P}+\vec{R}+\vec{f}$. En projection sur un axe perpendiculaire au support, cela donne $0=-mg\cos\alpha+R$, d'où s'extrait $R=mg\cos\alpha=1{,}8$ N. En projection sur un axe parallèle au mouvement, on a $ma=mg\sin\alpha-f$ ce qui donne $f=mg\sin\alpha-ma=0{,}79$ N.

Le poids, lui, a pour valeur $P=mg=1{,}96$ N.

### 20 Vrai ou faux ?

**a.** Faux. La troisième loi de Newton concerne deux systèmes en interaction. La caisse posée sur le sol est soumise à son poids (force exercée par la Terre sur la caisse) et la réaction du sol (force exercée par le sol sur la caisse) : il ne s'agit pas d'une paire de forces réciproques. Les caractéristiques de ces deux forces se justifient par la première loi de Newton puisque la caisse est immobile dans le référentiel considéré.

**b.** Faux. D'après la troisième loi de Newton, la valeur de la force exercée par la caisse sur la personne est la même que la valeur de la force exercée par la personne sur la caisse. Si la personne arrive à mettre en mouvement la caisse, c'est parce que la valeur de la force qu'elle exerce est supérieure à la valeur des autres forces (frottements par exemple) qui s'exercent sur la caisse dans le sens opposé.

**c.** Vrai. D'après la troisième loi de Newton, la force exercée par la Terre sur la caisse (le poids de la caisse) a la même valeur que celle qu'exerce la caisse sur la Terre.

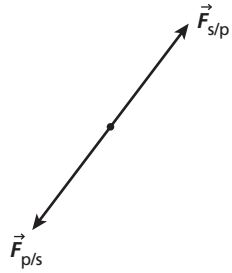
**d.** Faux, pour la même raison que la question précédente.

### 21 La marche

**a.** D'après la troisième loi de Newton, $\vec{F}_{s/p} = -\vec{F}_{p/s}$ puisque ces deux forces constituent une paire de forces en actions réciproques.

Donc, $\vec{F}_{s/p}$ et $\vec{F}_{p/s}$ont mêmes valeur et direction mais sont de sens contraires.

**b.** $\vec{F}_{s/p}$ peut se décomposer comme la somme vectorielle de deux forces : $\vec{R}$ (force normale au sol) et $\vec{f}$ (force de frottements tangentielle au sol).




Les forces de frottements sont dans cette situation dans le même sens du déplacement : ils contribuent donc à la marche.

**d.** En l'absence de frottement, Nina glisserait.

## Entraînement

### 22 Drag racing

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève p. 634.*

### 23 Équations horaires et unités

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève p. 635.*

### 24 Feu tricolore

**a.** Le point G subit le poids du feu $\vec{P} = m\vec{g}$, vertical et vers le bas, et les deux forces de tension des câbles $\vec{f}_1$ et $\vec{f}_2$, parallèles aux câbles et dirigées vers leurs points d'attache.

**b.** La première loi de Newton dans le référentiel terrestre supposé galiléen s'écrit $\vec{0} = \vec{P} + \vec{f}_1 + \vec{f}_2$.

En projection sur l'axe vertical, cela donne :

$$-mg + 2f\sin\alpha = 0,$$

soit finalement $f = \dfrac{mg}{2\sin\alpha}$.

Le poids a la valeur $P = mg = 41$ N.

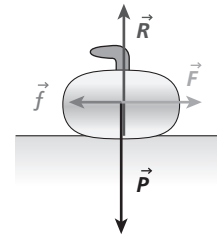
Les deux forces de tension ont pour valeur :

$$f = \frac{4{,}2 \times 9{,}81}{2 \times \sin(5{,}0°)} = 2{,}4.10^2 \text{ N}.$$

### 25 Curling

**1.** Voir le cours pour l'énoncé des lois de Newton.

**2.** *Première phase du mouvement* :



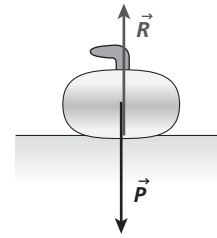

Le mouvement est rectiligne et accéléré.

La somme vectorielle des forces est donc horizontale et dans le même sens que l'accélération c'est-à-dire dans le sens du mouvement.

Le palet subit :

- son poids $\vec{P}$ vertical et vers le bas,
- la réaction normale de la glace $\vec{R}$ verticale et vers le haut,
- la force de frottements de la glace $\vec{f}$ horizontale et opposée au mouvement,
- la force exercée par le joueur $\vec{F}$ horizontale et dans le sens du mouvement.

*Deuxième phase du mouvement* :




Le mouvement est rectiligne et uniforme.

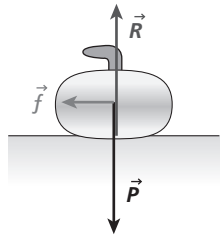
La somme vectorielle des forces est donc nulle.

Ces forces sont donc représentées par des vecteurs de même longueur, de même direction mais de sens contraire.

Les forces subies par le palet sont :

- son poids $\vec{P}$ vertical et vers le bas,
- la réaction normale de la glace $\vec{R}$ verticale et vers le haut.

*Troisième phase du mouvement* : le mouvement est rectiligne et décéléré. La somme vectorielle des forces est donc horizontale et de sens contraire au mouvement. Les forces subies par le palet sont :

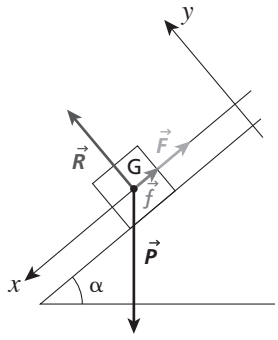



- son poids $\vec{P}$ vertical et vers le bas,
- la réaction normale de la glace $\vec{R}$ verticale et vers le haut,
- la force de frottements de la glace $\vec{f}$ horizontale et opposée au mouvement.

## 26 Équilibre d'un grimpeur

**a.** $F$ s'exprime en N et $\Delta\ell$ en m donc pour que l'égalité reste homogène, le coefficient de proportionnalité $k$ s'exprime en $N.m^{-1}$.

**b.** Bilan des forces qui s'exercent sur le cube :




- son poids : $\vec{P}$ vertical et vers le bas, et de valeur :

$P = mg$

$= 280.10^{-3} \times 9{,}81 = 2{,}75$ N,

- la force exercée par le ressort : $\vec{F}$ : parallèle au ressort et dirigée vers son point d'attache,
- la réaction normale du support $\vec{R}$ : perpendiculaire au support et vers le haut,
- la force de frottements $\vec{f}$ du plan incliné, parallèle au support et vers le haut de la pente.

**c.** Le solide est immobile dans le référentiel terrestre supposé galiléen, donc on utilise la première loi de Newton : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{F} + \vec{f} = \vec{0}$.

Pour trouver les valeurs de $\vec{R}$ et de $\vec{F}$, il faut projeter cette relation sur un repère cartésien défini sur le schéma.

La projection selon l'axe (G$x$) donne :

$$mg\sin\alpha - F - f = 0 \text{ soit } F = mg\sin\alpha - f$$

$F = 280.10^{-3} \times 9{,}81 \times \sin 40° - 0{,}20 = 1{,}6$ N.

La projection selon l'axe (G$y$) donne :

$$-mg\cos\alpha + R = 0 \text{ d'où}$$

$R = mg\cos\alpha = 280.10^{-3} \times 9{,}81 \times \cos 40° = 2{,}1$ N.

**d.** L'allongement du ressort est donc :

$$\Delta\ell = \frac{F}{k} = 0{,}20 \text{ m.}$$

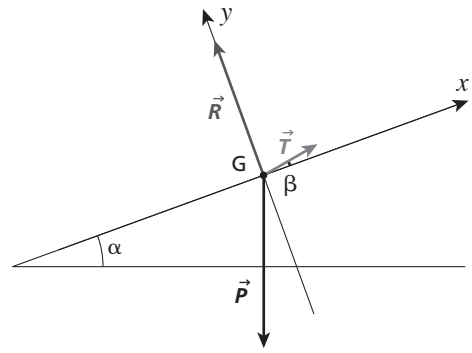
## 27 Construction des pyramides

**a.** Bilan des forces qui s'exercent sur le bloc de pierre :

- son poids $\vec{P}$ : vertical et vers le bas, de valeur $P = mg = 2{,}0.10^4$ N,
- la réaction normale de la rampe $\vec{R}$ : perpendiculaire à la rampe et vers le haut,
- la force de traction exercée par le câble $\vec{T}$ parallèle au câble et dans le sens de la montée,

**b.** Si le bloc se déplace en mouvement rectiligne et uniforme, alors les forces qui s'exercent sur lui ont une somme vectorielle nulle d'après la première loi de Newton dans le référentiel terrestre supposé galiléen : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{T} = \vec{0}$.

**c.**




**d.** Pour trouver les valeurs des forces autres que le poids, il faut projeter la première loi de Newton sur les axes choisis comme indiqués sur la figure ci-dessus.

Ainsi, une projection de la première loi de Newton sur l'axe (G$x$) donne :

$-mg\sin\alpha + T\cos\beta = 0$, d'où :

$$T = \frac{mg\sin\alpha}{\cos\beta} = \frac{2{,}0.10^3 \times 9{,}81 \times \sin(20°)}{\cos(10°)} = 6{,}8.10^3 \text{ N.}$$

Une projection de la première loi de Newton sur l'axe (G$y$) donne :

$$-mg\cos\alpha + R + T\sin\beta = 0,$$

soit : $R = mg\cos\alpha - T\sin\beta = mg\left(\cos\alpha - \sin\beta\dfrac{\sin\alpha}{\cos\beta}\right)$

$$= mg\left(\cos\alpha - \sin\alpha\tan\beta\right) = 1{,}7.10^4 \text{ N}$$

**e.** Si les frottements n'étaient plus négligeables, alors une force supplémentaire s'ajouterait : elle serait tangentielle à la rampe et de sens contraire au déplacement. Pour que le bloc soit en mouvement rectiligne et uniforme, il faut que la résultante selon l'axe (G$x$) soit nulle. Or, le poids ne varie pas, donc il faut que la coordonnée selon l'axe (G$x$) de la force $\vec{T}$ augmente. Si l'inclinaison du câble ne change pas, les ouvriers doivent tirer dessus plus intensément.

### 28 Palet de hockey

**a.** Sachant que $v = \frac{d}{\tau}$ alors $\tau = \frac{d}{v} = \frac{30}{6,0} = 5,0$ s.

**b.** Par définition, $a = \frac{v_i}{\tau} = \frac{12}{5,0} = 2,4$ m.s$^{-2}$.

**c.** La direction du vecteur accélération est celle du mouvement : horizontale. Son sens est opposé à celui du mouvement. Sa valeur est égale à sa valeur moyenne : 2,4 m.s$^{-2}$.

**d.** Inventaire des forces qui s'exercent sur le palet :

• son poids $\vec{P}$, vertical et vers le bas, de valeur $P = mg = 1,47$ N,

• la réaction normale de la patinoire $\vec{R}$, verticale et vers le haut,

• la force de frottements de la glace $\vec{f}$, horizontale et opposée au mouvement.

**e.** D'après la deuxième loi de Newton dans le référentiel terrestre supposé galiléen : $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = m\vec{a}$.

Pour déterminer la valeur de $\vec{f}$, il suffit de projeter la relation précédente sur un axe horizontal.

Cela donne $f = ma = 0,36$ N.

### 29 Parachute et parachutiste

**a.** Le système étudié est dans ce cas le parachutiste. Il est soumis à deux forces :

• son poids $\vec{P}_1$,

• la force exercée par le parachute sur le parachutiste : $\vec{F}_{2/1}$.

**b.** D'après l'énoncé, le mouvement du parachutiste est rectiligne et uniforme. Donc, d'après la première loi de Newton dans le référentiel terrestre supposé galiléen : $\vec{P}_1 + \vec{F}_{2/1} = \vec{0}$ soit $\vec{F}_{2/1} = -\vec{P}_1$.

Ainsi, $\vec{F}_{2/1}$ a la même valeur que $\vec{P}_1$ soit :

$F_{2/1} = m_1 g = 70 \times 9,81 = 6,9.10^2$ N.

**c.** Le système étudié est dans ce cas le parachute. Il est soumis à trois forces :

• son poids $\vec{P}_2$,

• la force exercée par le parachutiste sur le parachute : $\vec{F}_{1/2}$,

• la force exercée par l'air : $\vec{F}_{air/2}$.

**d.** Le mouvement du parachute est également rectiligne et uniforme. Ainsi, d'après la première loi de Newton : $\vec{P}_2 + \vec{F}_{1/2} + \vec{F}_{air/2} = \vec{0}$

soit $\vec{F}_{air/2} = -\vec{P}_2 - \vec{F}_{1/2}$.

Projetons cette relation vectorielle sur un axe $(Oz)$ ascendant : $F_{air/2} = -(-m_2 g) - (-F_{1/2})$.

Or, $F_{1/2} = F_{2/1} = 6,9.10^2$ N d'après la troisième loi de Newton.

Il vient : $F_{air/2} = 8,0 \times 9,81 + 6,9.10^2 = 7,7.10^2$ N.

## Approfondissement

### 30 Force de rappel d'un ressort

**a.** D'après la troisième loi de Newton, la force exercée par la masse sur le ressort est l'opposée de la force exercée par le ressort sur la masse, force de rappel du ressort.

**b.** Inventaire des forces qui s'exercent sur la masse marquée suspendue :

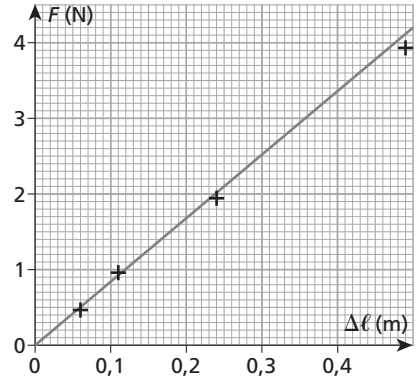
• son poids $\vec{P}$, vertical et vers le bas, de valeur $P = mg$,

• la force de rappel exercée par le ressort : $\vec{F}$.

D'après la première loi de Newton : $\vec{P} + \vec{F} = \vec{0}$ soit $\vec{F} = -\vec{P}$. Par projection de cette relation sur un axe vertical ascendant, il vient : $F = P = mg$.

**c.**

| $m$ (g) | 50,0 | 100 | 200 | 400 |
|---|---|---|---|---|
| $\Delta\ell$ (cm) | 6,2 | 11,0 | 23,8 | 48,2 |
| $F$ (N) | 0,491 | 0,981 | 1,96 | 3,92 |




**d.** Si $F$ est en newtons et l'allongement en mètres, vu que $k$ est en newtons par mètre, la relation correcte est $F = k\Delta\ell$.

**e.** La représentation graphique est modélisable par une droite passant par l'origine et de coefficient directeur 8,4 N.m$^{-1}$. On en déduit donc $k = 8,4$ N.m$^{-1}$.

### 31 Poussée d'Archimède

La balance est équilibrée dans l'air : cela impose que le poids de la couronne et celui du bloc d'or sont égaux, donc que leurs masses sont égales.

La couronne a donc bien la même masse que le bloc d'or. Reste à savoir si la couronne est constituée d'or ou d'un autre métal.

Dans l'eau, la balance n'est pas équilibrée. Les poids du bloc et de la couronne sont toujours les mêmes. En revanche, ils subissent également la poussée d'Archimède de l'eau, qui est proportionnelle à leur volume. Si le plateau de la couronne est plus haut que le plateau du bloc d'or, cela signifie que la poussée d'Archimède subie par la couronne est plus grande que la poussée d'Archimède subie par le bloc d'or. Donc que le volume de la couronne est plus grand que celui du bloc d'or.

La couronne a donc la même masse que le bloc d'or, mais un volume plus grand. Sa masse volumique est donc plus petite que celle du bloc d'or. Cela permet d'affirmer que la couronne n'est pas faite entièrement d'or, donc que l'orfèvre a triché.

### 32 Sphères chargées en équilibre

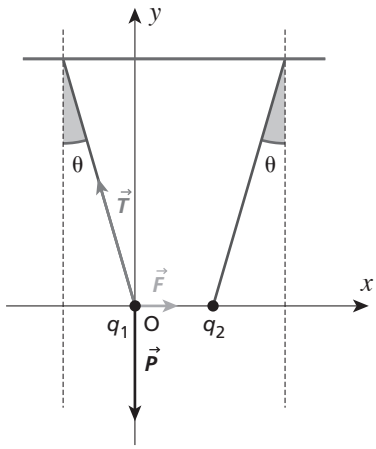
**a.** Bilan des forces qui s'exercent sur la charge $q_1$ :

• son poids $\vec{P}$ : vertical et vers le bas de valeur $P = mg = 0{,}098$ N,

• la force exercée par le fil auquel est accrochée la sphère de charge $q_1$ : $\vec{T}$,

• la force exercée par la charge $q_2$ : $\vec{F}$.

**b.** Le système d'axes le plus adapté pour cette étude statique serait un repère cartésien $(O\,xy)$ avec pour origine la charge $q_1$.




**c.** D'après la première loi de Newton dans le référentiel terrestre supposé galiléen :

$$\vec{P} + \vec{T} + \vec{F} = \vec{0}.$$

La projection selon l'axe $(O\,y)$ donne $-T\sin\theta + F = 0$, soit $F = T\sin\theta$, ou encore :

$$K\frac{|q_1| \times |q_2|}{d^2} = T\sin\theta \text{ ce qui donne } d = \sqrt{K\frac{|q_1| \times |q_2|}{T\sin\theta}}.$$

Pour déterminer la valeur de $T$, il faut projeter la relation vectorielle des forces selon l'axe $(O\,y)$ :

$$-mg + T\cos\theta = 0, \text{ soit } T = \frac{mg}{\cos\theta}.$$

L'expression de $d$ devient :

$$d = \sqrt{k\frac{|q_1| \times |q_2|}{\frac{mg}{\cos\theta}\sin\theta}} = \sqrt{k\frac{|q_1| \times |q_2|}{mg\tan\theta}}$$

$$\text{soit } d = \sqrt{9{,}0.10^9 \times \frac{\left|20.10^{-9}\right|^2}{10.10^{-3} \times 9{,}81 \times \tan(20°)}}$$

$$= 1{,}0.10^{-2} \text{ m} = 1{,}0 \text{ cm}.$$

**d.** Calcul des valeurs de chacune des forces :

• le poids : $P = mg = 10.10^{-3} \times 9{,}81 = 9{,}8.10^{-2}$ N,

• la force exercée par le fil :

$$T = \frac{mg}{\cos\theta} = \frac{10.10^{-3} \times 9{,}81}{\cos(20°)} = 0{,}10 \text{ N},$$

• la force exercée par la charge $q_2$ :

$$F = K\frac{|q_1| \times |q_2|}{d^2} = 9{,}0.10^9 \times \frac{\left(20.10^{-9}\right)^2}{\left(1{,}0.10^{-2}\right)^2} = 3{,}6.10^{-2} \text{ N}.$$

## Exercices de BAC

### 33 Le hockey sur gazon

**1.a.** Le référentiel terrestre est adapté.

**b.** La balle subit uniquement la force $\vec{F}$, parallèle au mouvement et orientée dans le sens de celui-ci.

**c.** La deuxième loi de Newton s'écrit $m\vec{a} = \vec{F}$, où $\vec{a}$ est l'accélération de la balle. La force $\vec{F}$ étant constante, l'accélération l'est aussi.

**d.** Le mouvement de la balle entre A et B est rectiligne (puisque le trajet est une droite) et uniformément accéléré puisque l'accélération $\vec{a}$ de la balle est constante.

**2.a.** Par définition, $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$.

**b.** Le mouvement étant uniformément accéléré, l'accélération instantanée est égale à l'accélération moyenne, de valeur $a = \frac{v_B}{\tau} = 1{,}3.10^2$ N.

**3.a.** La force exercée par la crosse a donc pour valeur $F = ma = 20$ N.

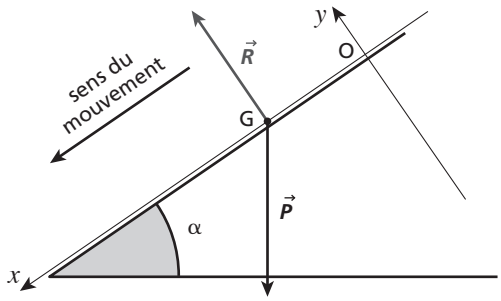
**b.** La valeur du poids est $P = mg = 1{,}6$ N. Comme il est plus de dix fois inférieur à $F$, il est possible de le négliger.

## 34 Le skieur

**I.1.** Le skieur subit :

• son poids $\vec{P} = m\vec{g}$, vertical et vers le bas, de valeur $P = mg = 7{,}8.10^2$ N,

• la réaction normale du support $\vec{R}$, perpendiculaire au support et orientée vers le haut.




**2.** La deuxième loi de Newton s'écrit :

$$m\vec{a} = \vec{P} + \vec{R}$$

donc l'accélération $\vec{a}$ du skieur s'écrit :

$$\vec{a} = \vec{g} + \frac{\vec{R}}{m}.$$

**3.** Le skieur n'a pas de mouvement selon $(0y)$, donc la coordonnée de l'accélération sur cet axe est nulle.

**4.** En projection sur l'axe $(0x)$, la deuxième loi de Newton s'écrit $ma = mg\sin\alpha$.

Cela donne $a = g\sin\alpha = 3{,}4$ m.s$^{-2}$.

**5.** L'accélération étant constante et la vitesse initiale nulle, la vitesse du skieur s'écrit $v = g\sin\alpha t$ au bout d'une durée $t$.

**6.** La distance parcourue s'en déduit par intégration :

$$d = \frac{1}{2} g\sin\alpha t^2.$$

**7.a.** La durée de parcours de la longueur $L$ vérifie $L = \frac{1}{2} g\sin\alpha t_1^2$, donc s'écrit $t_1 = \sqrt{\frac{2L}{g\sin\alpha}} = 9{,}5$ s.

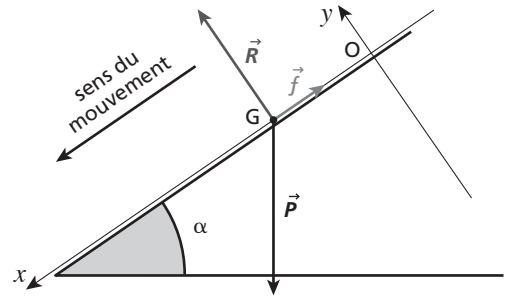
**b.** La vitesse acquise est alors $v_1 = g\sin\alpha t_1$, soit : $v_1 = \sqrt{2Lg\sin\alpha} = 32$ m.s$^{-1}$.

**II.1.** Si aucun frottement ne s'exerçait sur le skieur, alors il aurait un mouvement accéléré comme c'est le cas dans la partie **I**, d'après la deuxième loi de Newton.

S'il est en mouvement rectiligne et uniforme, c'est qu'une force supplémentaire, opposée au mouvement, s'applique.

Il subit donc nécessairement des frottements $\vec{f}$.

**2.**



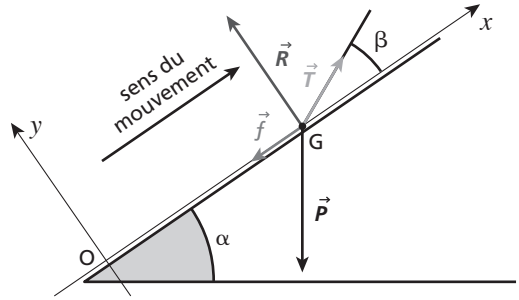

**3.** La première loi de Newton s'écrit $\vec{P} + \vec{R} + \vec{f} = \vec{0}$. En projection sur l'axe $(0x)$, on a $mg\sin\alpha - f = 0$, ce qui donne $f = mg\sin\alpha = 2{,}7.10^2$ N.

**4.** Ces frottements sont dus au contact avec le sol (frottements solides) et avec l'air (frottements fluides). Pour diminuer les frottements du sol, il faut farter les skis. Pour diminuer les frottements de l'air, des combinaisons spéciales, ainsi qu'une position adaptée du skieur, sont des solutions possibles.

**III.1.** Les forces qui s'exercent sur le skieur sont son poids $\vec{P}$, la force de traction de la perche $\vec{T}$, parallèle à la perche, la réaction normale de la piste $\vec{R}$ et la force de frottements $\vec{F}$, opposée au mouvement.

**2.** Le mouvement du skieur étant rectiligne et uniforme dans un référentiel considéré comme galiléen, la première loi de Newton indique que la somme vectorielle de ces forces est nulle : $\vec{P} + \vec{F} + \vec{R} + \vec{T} = \vec{0}$.

**3.**




**4.** En projection sur l'axe $(0x)$, la relation vectorielle de la question **III.2** donne :

$$-mg\sin\alpha - F + T\cos\beta = 0$$

d'où $$T = \frac{mg\sin\alpha + F}{\cos\beta} = 3{,}0.10^2 \text{ N}.$$

**5.** D'après la troisième loi de Newton, la valeur de la force exercée par le skieur sur la perche est également $T = 3{,}0.10^2$ N. Énoncé de la troisième loi de Newton : deux systèmes en interaction exercent l'un sur l'autre des forces opposées.

### 35 La vie d'une bulle

**I. a.** Le référentiel terrestre est adapté à l'étude.

**b.** La poussée d'Archimède est verticale et vers le haut.

**c.** La coordonnée verticale de la poussée d'Archimède est donc $F_{Az} = \rho_e V_0 g$.

**II.a.** Le poids de la bulle a pour valeur $P_0 = \rho_{dc} V_0 g$. Le rapport entre le poids et la poussée d'Archimède est donc $\frac{P_0}{F_A} = \frac{\rho_{dc}}{\rho_e}$. Or, le dioxyde de carbone est plus de 500 fois moins dense que l'eau. Le poids est donc négligeable devant la poussée d'Archimède.

**b**. D'après la deuxième loi de Newton, l'accélération de la bulle vérifie $m\vec{a} = \vec{F}_A$, ce qui donne $\rho_{dc} V_0 az = \rho_e V_0 g$, d'où $a_z = \frac{\rho_e}{\rho_{dc}} g$. Le vecteur accélération est vertical et vers le haut, de coordonnée $az$.

**c.** La valeur de la vitesse est donc $v = \frac{\rho_e}{\rho_{dc}} gt$.

**d.** La durée $t_s$ est donc $t_s = \frac{v_s \rho_{dc}}{\rho_e g} = 2{,}7.10^{-5}$ s, soit environ trente microsecondes.

**e.** Le modèle n'est probablement pas valide, car on voit bien une bulle remonter, alors que si elle montait en trente microsecondes on ne la verrait pas à l'œil nu.

## Rédiger une synthèse de documents

### 36 Accélération et téléphone mobile

*Analyse de la question*

Il s'agit d'expliquer en termes physiques la méthode de repérage par un accéléromètre de l'orientation d'un téléphone portable dans lequel il est placé. Pour ce faire, la seule information sur le fonctionnement d'un accéléromètre figure dans le texte du document 1 p. 163 du manuel de l'élève et dans le schéma de la figure 2 associée. Le reste des connaissances à utiliser provient du cours.

*Remarque* : le corrigé suivant présente le raisonnement que l'élève peut faire, mais n'est pas une description technique de la manière dont les accéléromètres, inclinomètres ou gyromètres fonctionnent pour effectivement répondre à la question. Le modèle de l'accéléromètre à ressorts présentés est en effet, trop simpliste pour entrer dans ces détails techniques.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Analyser le document 1 p. 163 et montrer qu'un accéléromètre permet de déterminer le **vecteur accélération** de l'objet dans lequel il est placé. La figure 2 p. 163 indique, en effet, que **trois axes** sont utilisés dans l'accéléromètre. Il faut comprendre que cette mesure passe par la détermination du **vecteur position** de la sphère maintenue par des ressorts (le texte du document 1 p. 263 parle de déplacement de la sphère).

**2.** Utiliser la **deuxième loi de Newton** pour comprendre que s'il s'agit uniquement de déterminer une **orientation**, alors il faut envisager que le boîtier de l'accéléromètre, de même que la sphère elle-même, puissent être à l'**équilibre** lors de cette détermination : il n'est pas question de déterminer un mouvement.

**3.** Par conséquent, il est possible d'utiliser la **première loi de Newton** appliquée à la sphère, soumise aux six forces de rappel des ressorts et à son **poids**. Du fait de son poids, elle ne se trouve pas à la position centrale. Le **vecteur déplacement** correspondant est connu et est, si les six ressorts sont identiques, parallèle au **vecteur champ de pesanteur**.

**4.** Il est possible ainsi de déterminer l'**orientation du champ de pesanteur** dans le système d'axes, donc de connaître la **direction verticale** et **orientée vers le bas** dans ce système d'axes, lié au boîtier de l'accéléromètre. L'orientation par rapport à la verticale orientée vers le bas de l'appareil contenant l'accéléromètre est ainsi connue.

Chapitre 6

# Mouvements dans un champ uniforme

## Introduction au chapitre (p. 164)

Ce chapitre est envisagé comme un chapitre d'application du chapitre 5, où les outils de la mécanique classique ont été définis et où les exercices ne traitaient pas, volontairement, de mouvements dans un champ uniforme. Le périmètre de ce chapitre est donc très restreint : il correspond à la compétence exigible « Connaître et exploiter les trois lois de Newton ; les mettre en œuvre pour étudier des mouvements dans des champs de pesanteur et électrostatique uniformes » et à la compétence expérimentale « Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement ».

Pour autant, le contenu est conséquent, ce qui justifie qu'un chapitre entier ait été consacré à ces mouvements. En outre, les élèves arrivent dorénavant en Terminale S sans avoir jamais fait de dynamique et quasiment pas de statique ou d'énergétique. Les méthodes, mises en place dans le chapitre 5, méritent donc d'être détaillées dans ce chapitre 6.

Le programme ne précise pas que les mouvements à étudier sont des mouvements sans frottements et où la poussée d'Archimède est négligeable ; il ne précise même pas qu'il s'agit de mouvements de projectiles. Nous avons donc fait le choix restrictif de considérer des mouvements où une seule force s'exerce sur l'objet ramené à un point : son poids pour le cas d'un projectile en mouvement dans le champ de pesanteur uniforme, la force électrique pour le cas d'une particule chargée en mouvement dans un champ électrostatique uniforme (mais dans ce dernier cas, la discussion sur la possibilité de négliger le poids est détaillée). Ce choix est cohérent avec le fait qu'aucune équation différentielle ne soit au programme, ni en mathématiques ni en physique. Les résolutions pourront donc être faites en recherchant simplement des primitives, qu'il est possible d'introduire auprès des élèves facilement.

Deux activités documentaires sont proposées ; elles peuvent être traitées ensemble ou séparément, en autonomie ou en classe, comme réinvestissement ou comme introduction guidée. L'activité expérimentale proposée est un traitement vidéo, dont une alternative figure en épreuve de type ÉCE p. 572 du manuel de l'élève.

## Activités

### 1 Accélération d'électrons (p. 166)

#### *Objectif*

L'objectif de cette activité est de travailler l'aspect théorique de la résolution d'un problème de mécanique. Les questions, pour ce faire, conduisent l'élève à la relation entre vitesse de sortie et tension accélératrice. Cette activité peut ensuite être prolongée avec l'activité 2, envisagée sur un mode moins théorique et plus qualitatif.

#### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre les trois lois de Newton pour étudier des mouvements dans un champ électrostatique uniforme.

#### *Corrigé*

**a.** Si le mouvement est rectiligne et horizontal, c'est que les électrons ne subissent pas de force verticale qui les dévierait : le poids est donc négligeable.

**b.** Le champ électrostatique a pour expression $\vec{E} = -\frac{U_{AC}}{d}\vec{i}$. Le système étudié est l'électron dans le référentiel terrestre supposé galiléen. Il subit uniquement la force électrique $\vec{F} = -e\vec{E}$. La deuxième loi de Newton s'écrit donc $m\vec{a} = \vec{F}$, ce qui donne $\vec{a} = \frac{eU_{AC}}{md}\vec{i}$. Le vecteur accélération est donc bien porté par l'axe $(Ox)$ et sa coordonnée est $a_x = \frac{eU_{AC}}{md}$.

La trajectoire étant une droite et l'accélération constante, le mouvement est rectiligne et uniformément accéléré.

**c.** Si l'électron n'est soumis à aucune force, son mouvement est rectiligne et uniforme d'après la première loi de Newton.
Si la tension $U_{AC}$ est augmentée, l'électron est plus accéléré dans le canon, donc son mouvement après sa sortie du canon a une vitesse plus élevée.

**d.** La position initiale de l'électron est O : sa coordonnée initiale est $x = 0$.
Sa vitesse initiale est nulle d'après l'énoncé (« arrachés avec une vitesse négligeable »).

**e.** Par définition, $a_x = \frac{dv_x}{dt}(t)$.
On en déduit, compte tenu des conditions initiales sur la vitesse, que $v_x(t) = \frac{eU_{AC}}{md}t$.
Par définition, $v_x(t) = \frac{dx}{dt}(t)$.
On en déduit, compte tenu des conditions initiales sur la position, que $x(t) = \frac{eU_{AC}}{2md}t^2$.

**f.** La date de passage au point d'abscisse $d$ vérifie $d = \frac{eU_{AC}}{2md}t_A^2$, ce qui donne $t_A = d\sqrt{\frac{2m}{eU_{AC}}}$.

**g.** La vitesse de passage en A est donc :

$$v_A = \frac{eU_{AC}}{md}t_A = \sqrt{\frac{2eU_{AC}}{m}}.$$

Le calcul donne $v_A = 1{,}9.10^7$ m.s$^{-1}$.

### *Commentaires*

Cette activité peut être traitée comme un exercice d'application, après le cours, ou bien servir justement de mise en place du cours en utilisant uniquement les acquis du chapitre 5. Il est intéressant de la poursuivre par l'activité 2, qui la met en perspective historique.

## 2 Déviation d'un faisceau d'électrons (p. 167)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

### *Objectif*

Cette activité prolonge la précédente, qui a montré de manière théorique comment connaître la vitesse des électrons, connaissant la tension accélératrice. Ici, le but est d'aborder la méthode utilisée historiquement par Thomson pour déterminer le rapport charge/masse de l'électron. Les mouvements dans un champ magnétique uniforme n'étant pas au programme, la description précise de cette méthode n'est pas possible. La vitesse d'arrivée sera donc supposée connue.

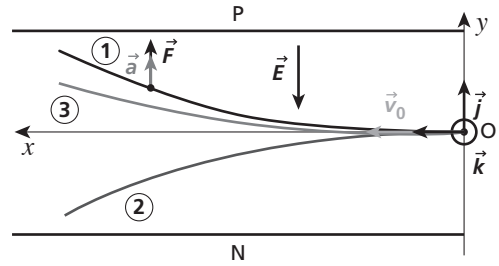
### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre les trois lois de Newton pour étudier des mouvements dans un champ électrostatique uniforme.

### *Corrigé*

La valeur du champ entre P et N est :
$E = \frac{U_{PN}}{d'} = 1{,}5.10^4$ V.m$^{-1}$.

Voir la courbe ① sur la figure suivante.




Si la polarité est inversée, on obtient la courbe ② de la figure précédente. Si $U_{PN}$ est moins grande, on obtient la courbe ③.
L'ordonnée du point de sortie, pour une abscisse $x = L$, est $y_S = 2{,}0$ cm d'après la figure.
On en déduit $\frac{e}{m} = \frac{2y_S d' v_A^2}{U_{PN}L^2} = 1{,}8.10^{11}$ C.kg$^{-1}$.
La valeur réelle de ce rapport est :

$$\frac{e}{m} = \frac{1{,}602.10^{-19}}{9{,}109.10^{-31}} = 1{,}759.10^{11}\ \text{C.kg}^{-1}.$$

Les différentes erreurs peuvent provenir de la lecture des coordonnées du point de sortie ($y_S$ en particulier) et des paramètres géométriques, ainsi que des mesures de tension $U_{PN}$ et $U_{AC}$ (qui fournit la valeur de $v_A$).

### *Commentaires*

L'expérience historique utilisait un champ magnétique créé par des bobines de Helmholtz en plus du champ électrostatique. L'expérience se déroulait en deux temps : un premier temps où les deux champs étaient actifs, réglés de sorte que la trajectoire des électrons soit une droite confondue avec l'axe $(Ox)$ : ceci permettait de connaître la vitesse d'arrivée des électrons (qui n'est pas calculable sans déjà connaître $\frac{e}{m}$). Puis le champ magnétique était coupé et on revenait à l'expérience en question.
La connaissance de la valeur de $e$ (par exemple grâce à l'expérience de Millikan en 1910) donne ensuite la valeur de $m$.

## 3 Projectile dans le champ de pesanteur uniforme (p. 168)

### *Objectifs*

Cette activité expérimentale consiste classiquement à étudier un mouvement parabolique à l'aide d'une vidéo, à faire ou déjà réalisée. Les données ainsi collectées sont ensuite analysées mathématiquement. C'est là l'occasion de se familiariser avec les équations et de faire le lien entre leurs expressions numériques obtenues par le logiciel de traitement, leurs expressions littérales obtenues par la théorie, et les différentes représentations graphiques.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement.

### *Corrigé*

Le mouvement horizontal est uniforme, le mouvement vertical est uniformément accéléré.
L'angle de tir est obtenu en identifiant $\tan\alpha$ au coefficient en $x$ dans l'équation cartésienne obtenue par la modélisation informatique.
Ensuite, le coefficient en $x^2$ permet d'obtenir la valeur de $v_0$.
La valeur de $v_0$ s'exprime comme $v_0 = \sqrt{{v_{0x}}^2 + {v_{0y}}^2}$ et l'angle de tir s'obtient par $\tan\alpha = \dfrac{v_{0y}}{v_{0x}}$.
Les équations horaires de la vitesse sont de la forme $v_x(t) = \text{cte}$ et $v_y(t) = at + b$.
Les représentations graphiques font apparaître une vitesse horizontale constante et une vitesse verticale affine.
Les coefficients directeurs des droites $v_x(t)$ et $v_y(t)$ donnent les coordonnées du vecteur accélération : $(0 ; -g)$.
La deuxième loi de Newton appliquée au projectile dans le référentiel terrestre supposé galiléen, et subissant uniquement son poids, s'écrit $m\vec{a} = m\vec{g}$, ce qui donne $\vec{a} = \vec{g}$. C'est bien cohérent avec les coordonnées trouvées.

### *Commentaires*

Les choix d'étude faits ici permettent de faire le lien entre équations et représentations graphiques. Ce ne sont pas les seules études possibles.
La flèche et la portée, dont les expressions peuvent être données, peuvent aussi servir aux déterminations de $v_0$ et $\alpha$, par exemple.

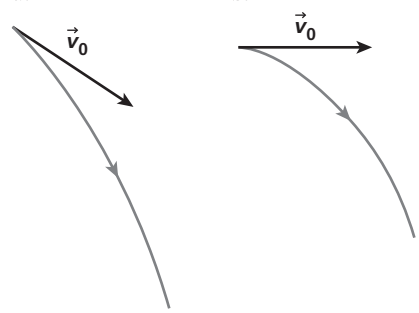
Il faut éviter de dériver deux fois la position numériquement pour obtenir l'accélération : le résultat est rarement satisfaisant, car les pointages, même effectués proprement au pixel près, ne permettent pas de faire une dérivée seconde numérique très bonne. Il vaut donc mieux mesurer les coefficients directeurs des coordonnées de la vitesse pour obtenir les coordonnées de l'accélération.

# Exercices

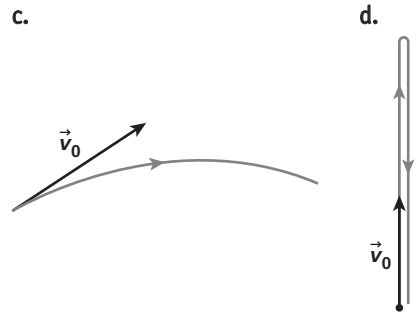
## Applications

### 1 Vitesses initiales et trajectoires

**a.** **b.**

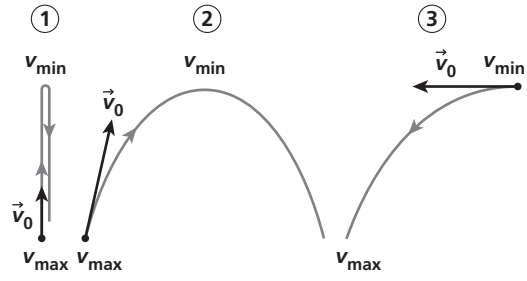



**c.** **d.**



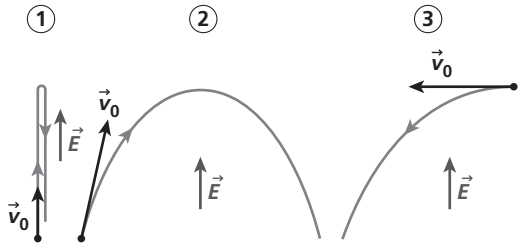

### 2 Quelle vitesse initiale ?

**a.** et **b.**




La vitesse est toujours minimale au sommet de la trajectoire, là où elle n'est qu'horizontale.

### 3 Quel champ électrostatique ?




L'accélération étant vers le bas, la force électrique est vers le bas aussi.
De ce fait, comme la charge est négative, le champ électrostatique est vers le haut dans les trois cas.

### 4 Vrai ou faux ? (1)

**A** Vrai : si la vitesse initiale est nulle, le mouvement est rectiligne uniformément accéléré, car c'est le vecteur accélération constant qui impose la direction du mouvement.

**B** Vrai car l'accélération est de même sens que $\vec{E}$ et $\vec{v}_0$, le mouvement est rectiligne uniformément accéléré, l'accélération étant constante.

**C** Faux : l'accélération est de même sens que $\vec{E}$ et $\vec{v}_0$ lui est opposée, de ce fait, le mouvement est rectiligne uniformément ralenti.

**D** Faux : le mouvement est alors parabolique.

### 5 Vrai ou faux ? (2)

**A** Vrai pour les mêmes raisons que dans l'exercice précédent.

**B** Faux car le mouvement est alors rectiligne uniformément ralenti ($\vec{a}$ et $\vec{v}_0$ étant alors opposés).

**C** Vrai car $\vec{a}$ et $\vec{v}_0$ sont colinéaires et de même sens et $\vec{a}$ est constant.

**D** Faux : le mouvement est parabolique.

### 6 Accélération dans un champ électrostatique uniforme

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 635.*

### 7 Vrai ou faux ? (3)

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 635.*

### 8 Vrai ou faux ? (4)

**A** Vrai car la valeur de la force électrique est alors $F = |q_A|E = |q_B|E$.

**B** Faux car la valeur de l'accélération est $a_A = \dfrac{|q_A E|}{m_A}$ pour l'une et $a_B = \dfrac{|q_B E|}{m_B} = \dfrac{|q_A E|}{2m_A}$ pour l'autre.

**C** Faux car l'accélération de la particule A est double de celle de B et comme $v = at$, c'est impossible.

**D** Faux pour la même raison qu'à la question précédente.

### 9 Ion magnésium

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève p. 635.*

### 10 Forces subies par un électron

**a.** Le poids de l'électron vaut :

$$P = mg = 9{,}1.10^{-31} \times 9{,}8 = 8{,}9.10^{-30} \text{ N}$$

et la force électrique vaut :

$$F = eE = 1{,}6.10^{-19} \times 1{,}0.10^{4} = 1{,}6.10^{-15} \text{ N}.$$

**b.** Le quotient de ces deux forces vaut :

$$\frac{P}{F} = \frac{8{,}9.10^{-30}}{1{,}6.10^{-15}} = 5{,}6.10^{-15}.$$

Le poids de l'électron est donc négligeable devant la force électrique qu'il subit.

**c.** De ce fait, la deuxième loi de Newton s'écrit $\vec{F} = -e\vec{E} = m\vec{a}$. L'électron subit donc l'accélération $a = \dfrac{eE}{m} = \dfrac{1{,}6.10^{-15}}{9{,}1.10^{-31}} = 1{,}8.10^{15}$ m.s$^{-2}$.

### 11 Lâcher d'une boule de pétanque

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 635.*

### 12 Pétanque sur la Lune ?

Voir le corrigé de l'exercice 14 dans le manuel de l'élève.
Sur la Lune $t_L = \sqrt{\dfrac{2h}{g_L}} = 1{,}5$ s
et $v_L = \sqrt{2g_L h} = 2{,}6$ m.s$^{-1}$
L'attraction lunaire étant six fois plus petite que l'attraction terrestre, pour une même hauteur, la chute dure plus et la vitesse atteinte est plus faible.

### 13 Proton accéléré

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 635.*

### 14 Chute d'un grimpeur encordé

**a.** Le système étudié est le grimpeur dans le référentiel terrestre supposé galiléen.
Le grimpeur ne subit que alors son poids pendant la chute, en effet la corde n'agit sur lui que lorsque la chute est enrayée par le blocage de la corde par son assureur.
Il est donc en chute libre.
L'application de la deuxième loi de Newton conduit à $m\vec{a} = \vec{P} = m\vec{g}$, ce qui donne $\vec{a} = \vec{g}$.

L'accélération et la vitesse initiale étant toutes deux verticales, le mouvement est rectiligne uniformément varié.

**b.** Le repère choisi est $(0y)$ avec 0, point de départ de la chute et l'axe vertical $(0y)$ vers le bas. L'origine des dates est choisie au moment où le grimpeur commence à tomber. En intégrant, on obtient à partir de $\frac{dv}{dt} = g$ grâce à la condition initiale sur la vitesse ($v_0 = 0$) l'expression $v = gt$.

On obtient en intégrant $\frac{dy}{dt} = gt$ l'équation $y(t) = \frac{1}{2}gt^2$ sachant que la condition initiale sur la position est $y_0 = 0$.

La hauteur de chute s'exprime donc sous la forme $h = \frac{1}{2}gt^2$ d'où une durée de chute

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 4{,}0}{9{,}8}} = 0{,}90 \text{ s}.$$

**c.** La vitesse atteinte au bout de 4,0 m de chute est donc : $v = gt = g\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh}$. Numériquement, elle vaut $v = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 4{,}0} = 8{,}9$ m.s$^{-1}$.

Le grimpeur au bout de 4,0 m de chute atteint une vitesse de 32 km.h$^{-1}$.

*Remarque :* lors du blocage de la corde, l'élasticité de celle-ci lui permet de ne pas subir un choc trop violent.

### 15 Électron dans un champ électrostatique

Le système étudié est l'électron, dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

D'après l'application de la deuxième loi de Newton, il vient :

$$\vec{F} = q\vec{E} = m\vec{a}.$$

Il apparaît donc la relation $ma = |qE| = eE$.

D'où $a = \frac{eE}{m}$. L'accélération est donc constante dans le sens du mouvement.

La vitesse initiale étant nulle, le mouvement de l'électron est rectiligne uniformément accéléré.

La vitesse est donc exprimée par $v = at = \frac{eE}{m}t$.

L'accélération est alors $a = \frac{v}{t}$.

Ce qui donne $a = \frac{2{,}0.10^7}{1{,}0.10^{-8}} = 2{,}0.10^{15}$ m.s$^{-1}$.

La force électrique subie par l'électron est :

$F = ma = 9{,}1.10^{-31} \times 2{,}0.10^{15} = 1{,}8.10^{-15}$ N.

## Entraînement

### 16 Lancer d'une balle vers le haut

**a.** Le système étudié est la balle dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

Le point choisi comme origine est le point de lancer 0.

Le repère choisi est $(0y)$ vers le haut et l'origine des dates est l'instant du lancer.

Les conditions initiales du lancer sont les suivantes :

$$\overrightarrow{OG}(0) = y_0\vec{j} \text{ et } \vec{v}_0 = v_{0y}\vec{j}.$$

L'accélération de la balle est toujours $\vec{a} = \vec{g}$. L'accélération et la vitesse initiale étant toutes deux verticales, le mouvement est rectiligne uniformément varié.

C'est-à-dire $\vec{a} = a_y\vec{j} = -g\vec{j}$ d'où $a_y = \frac{dv_y}{dt} = -g$.

En intégrant, on obtient donc $v_y = -gt + A$ où $A$ est une constante d'intégration déterminée grâce à la condition initiale sur la vitesse : $v_{0y} = g \times 0 + A$ d'où $A = v_{0y}$ et $v_y = -gt + v_{0y}$. De même, on obtient en intégrant cette dernière expression :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t + B$$

où $B$ est une constante d'intégration déterminée grâce à la condition initiale sur la position.

Soit $y(0) = -\frac{1}{2}g \times 0^2 + v_{0y} \times 0 + B = y_0 = 0$ d'où $B = y_0 = 0$.

Finalement, nous obtenons donc l'équation horaire du mouvement suivante : $y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t$.

Au sommet S, la vitesse est nulle, donc :

$v_{Sy} = -gt_S + v_{0y}$,

d'où s'extrait $t_S = \frac{v_{0y}}{g} = \frac{10}{9{,}8} = 1{,}0$ s.

L'ordonnée du sommet est :

$$y_S = -\frac{1}{2}gt_S^2 + v_{0y}t_S + y_0 = -\frac{1}{2}g\frac{v_{0y}^2}{g^2} + v_{0y}\frac{v_{0y}}{g}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{v_{0y}^2}{g} = \frac{1}{2} \times \frac{10^2}{9{,}8} = 5{,}1 \text{ m}$$

**b.** Au point correspondant au retour à l'altitude de lancer, l'ordonnée est nulle, soit :

$$0 = -\frac{1}{2}gt_1^2 + v_{0y}t_1 = t_1\left(-\frac{1}{2}gt_1 + v_{0y}\right).$$

Il y a deux solutions à cette équation :

- soit $t_1 = 0$ qui est la date de lancer,
- soit $t_1 = \frac{2v_{0y}}{g} = 2t_S$ donc $t_1 = \frac{2 \times 10}{9{,}8} = 2{,}0$ s.

Le retour à la position initiale se fait donc 2,0 s après le lancer.

**c.** À cette date, la vitesse est :

$$v_1 = -gt_1 + v_{0y} = \frac{-2gv_{0y}}{g} + v_{0y} = -v_{0y}$$

Le calcul donne : $v_1 = -10$ m.s$^{-1}$.
Conclusion : en repassant à la même altitude à la descente, la vitesse de la balle est la même qu'au moment du lancer, mais en sens inverse.

## 17 Atteindre la rive opposée

**a.** La deuxième loi de Newton est appliquée afin de déterminer l'accélération
Le système étudié est le galet dans le référentiel terrestre supposé galiléen.
Le galet ne subit que son poids $\vec{P} = m\vec{g}$.
La masse du galet étant constante, le champ de pesanteur étant uniforme, le poids est une force constante, verticale dirigée vers le bas.
Application de la deuxième loi de Newton :

$$m\vec{a} = \vec{P} = m\vec{g}$$

Cette relation se réduit à $\vec{a} = \vec{g}$.
Le galet est lancé du point B à la date $t = 0$ avec une vitesse initiale horizontale $\vec{v}_0$.
Son mouvement est étudié dans le repère $(0, \vec{i}, \vec{j})$.
Les conditions initiales sont les suivantes :

$$\overrightarrow{OG}(0) = h\vec{j} \text{ et } \vec{v}_0 = v_0\vec{i}.$$

C'est-à-dire $\vec{a} = a_y\vec{j} = -g\vec{j}$ d'où $a_y = \dfrac{dv_y}{dt} = -g$.

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ d'où } \vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = v_0 \\ v_x(t) = -gt \end{cases}$$

compte tenu des conditions initiales.
De même :

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} \text{ d'où } \overrightarrow{OG}(t)\begin{cases} x(t) = v_0 t \\ y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 \end{cases}$$

D'où $h = \dfrac{1}{2}gt_A^2 = \dfrac{1}{2} \times 9{,}8 \times 3{,}0^2 = 44$ m

**b.** L'abscisse du point A vérifie $x_A = v_B t_A$ puisque le mouvement horizontal est uniforme.
Cela donne $x_A = 20{,}0 \times 3{,}0 = 60$ m :
la rive opposée est donc largement atteinte.

**c.** Les coordonnées de la vitesse en A sont :

$$\vec{v}_A\begin{cases} v_{Ax} = v_0 \\ v_{Ay} = -gt_A \end{cases} \text{ d'où } v_A = \sqrt{v_{Ax}^2 + v_{Ay}^2} = \sqrt{v_0^2 + g^2 t_A^2}$$

Le calcul donne :

$$v_A = \sqrt{20{,}0^2 + (9{,}8 \times 3{,}0)^2} = 36 \text{ m.s}^{-1}.$$

## 18 Trajectory of a golf ball

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 635.*

## 19 Déflexion électrique

**a.** Le champ électrostatique a pour valeur :

$$E = \frac{U_{AB}}{d} = \frac{6{,}00.10^2}{6{,}0.10^{-2}} = 1{,}0.10^4 \text{ V.m}^{-1}.$$

**b.** La force électrostatique subie par l'électron a pour valeur

$$F = eE = e\frac{U_{AB}}{d} = \frac{1{,}6.10^{-19} \times 6{,}00.10^2}{6{,}0.10^{-2}} = 1{,}6.10^{-15} \text{ N}.$$

Le poids de l'électron a pour valeur
$P = mg = 9{,}1.10^{-31} \times 9{,}8 = 8{,}9.10^{-30}$ kg.
On constate que la valeur du rapport $\dfrac{P}{F}$ est très inférieure à 1 car $\dfrac{P}{F} = \dfrac{8{,}9.10^{-30}}{1{,}6.10^{-15}} = 5{,}6.10^{-15}$.
On peut donc négliger le poids $P$ devant la force électrostatique $F$.

**c.** Appliquons la deuxième loi de Newton au système {électron} dans le référentiel terrestre supposé galiléen : $m\vec{a} = \vec{F} = q\vec{E}$.
L'électron arrive en 0 à date $t = 0$.
Les conditions initiales sont les suivantes :

$$\overrightarrow{OG}(0)\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0 \end{cases} \text{ et } \vec{v}(0)\begin{cases} v_{0x} = v_0 \\ v_{0y} = 0 \end{cases}$$

Le vecteur accélération s'écrit $\vec{a} = \dfrac{q}{m}\vec{E}$ ou encore $\vec{a} = \dfrac{-e}{m}\vec{E}$ soit $\vec{a}\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \dfrac{e}{m}E \end{cases}$.

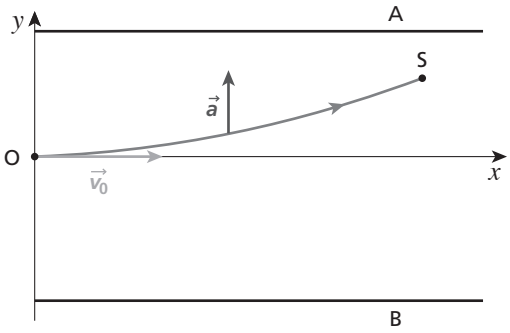
**d.** L'expression du vecteur vitesse s'obtient à partir de :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \text{ d'où } \vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = v_{0x} = v_0 \\ v_y(t) = \frac{e}{m}Et + v_{0y} = \frac{e}{m}Et \end{cases}$$

Les équations horaires du mouvement s'obtiennent à partir de :

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} \text{ d'où } \overrightarrow{OG}(t)\begin{cases} x(t) = v_0 t + x_0 = v_0 t \\ y(t) = \frac{eE}{2m}t^2 + y_0 = \frac{eU}{2md}t^2 \end{cases}$$

La trajectoire s'obtient en éliminant le temps de la dernière équation grâce à $t = \dfrac{x}{v_0}$ soit $y = \dfrac{eUx^2}{2mdv_0^2}$.
La trajectoire est une parabole dans le plan $(0xy)$ incurvée vers la plaque positive A.




**e.** L'ordonnée $y_S$ du point de sortie est $y_S = \dfrac{eU_{AB}L^2}{2mdv_0^2}$

$$y_S = \frac{+1{,}6.10^{-19} \times 6{,}00.10^2 \times \left(1{,}0.10^{-1}\right)^2}{2 \times 9{,}1.10^{-31} \times 6{,}0.10^{-2} \times \left(2{,}00.10^7\right)^2}$$

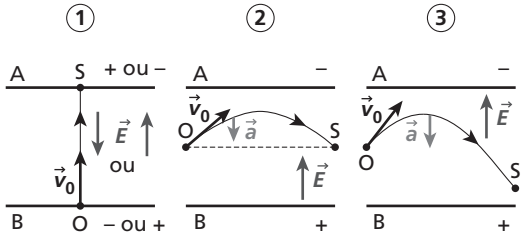
$= 2{,}2.10^{-2}$ m $= 2{,}2$ cm.

**f.** Après le point S, l'électron est en mouvement rectiligne et uniforme, car on peut négliger l'effet du poids sur le mouvement vu la vitesse extrêmement élevé de l'électron. Celui-ci est alors en effet un système isolé.

## 20 Déviation de faisceaux

On peut remarquer que $\vec{a} = \dfrac{q}{m}\vec{E}$ avec $\dfrac{q}{m} < 0$, donc le vecteur accélération est opposé au vecteur champ électrostatique.

**a.**




**b.** ① : il y a indétermination, la trajectoire peut être rectiligne orthogonale aux plaques, mais il n'y a pas de certitude sur le sens de l'accélération et donc sur le signe de la polarité.

On ne peut dire si la valeur de la vitesse de sortie est plus grande ou plus faible que celle d'entrée.

② : la tension entre S et O est nulle donc la vitesse de sortie est égale à la vitesse d'entrée. Donc $v_S = v_0$.

③ : le point S est situé après de point situé au même niveau que O par rapport aux plaques, de ce fait, la vitesse en S est supérieure à celle en O.

## 21 Canon à électrons

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 635.*

## 22 Ion dans un champ électrostatique

**a.** Le rapport de la force électrique au poids de l'ion sodium s'écrit : $\dfrac{F}{P} = \dfrac{eE}{mg}$.

Sa valeur est : $\dfrac{F}{P} = \dfrac{1{,}6.10^{-19} \times 4{,}0.10^3}{3{,}8.10^{-26} \times 9{,}8} = 1{,}7.10^9$.

Le poids peut donc être négligé devant la force électrique.

**b.** Le système étudié est l'ion sodium. La seconde loi de Newton s'écrit $m\vec{a} = \vec{F} = q\vec{E}$.

L'accélération de l'ion sodium a pour valeur $a = \dfrac{eE}{m}$ soit $a = \dfrac{1{,}6.10^{-19} \times 4{,}0.10^3}{3{,}8.10^{-26}} = 1{,}7.10^{10}$ m.s$^{-2}$.

**c.** L'ion sodium a un mouvement rectiligne uniformément accéléré car il subit une accélération constante et sa vitesse initiale est nulle.

**d.** Suivant l'axe $(Ox)$ l'accélération a pour coordonnée :

$$a_x = e\frac{E}{m}.$$

Le vecteur vitesse s'obtient grâce à $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$ : il vient $\vec{v} = v_x\vec{i} = \left(e\dfrac{E}{m}t + v_{0x}\right)\vec{i}$.

Or $v_{0x} = 0$, d'où $v_x(t) = +e\dfrac{E}{m}t$. Comme $v_x = v$, il vient $v(t) = e\dfrac{E}{m}t$ et finalement $v(t) = e\dfrac{U_{PN}}{md}t$

**e.** La relation entre le vecteur vitesse et le vecteur position est :

$$\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt} \text{ d'où } \overrightarrow{OG} = \left(\frac{eU_{PN}}{2md}t^2 + x_0\right)\vec{i} = x\vec{i}.$$

Or $x(0) = x_0 = 0$, donc l'équation horaire s'écrit :

$$x(t) = \frac{eU_{PN}}{2md}t^2.$$

**f.** À l'arrivée de l'ion sodium au niveau du point B, d'abscisse $x_B = d$, la date est $t_B = \sqrt{\dfrac{2md^2}{eU_{PN}}}$.

D'où $t_B = d\sqrt{\dfrac{2m}{eEd}}$ soit :

$$t_B = 0{,}40 \times \sqrt{\frac{2 \times 3{,}8.10^{-26}}{1{,}6.10^{-19} \times 4{,}0.10^3 \times 0{,}40}} = 6{,}9.10^{-6} \text{ s.}$$

**g.** À la sortie des plaques, au point B, la valeur de la vitesse est donc :

$$v_B = \frac{eU_{PN}}{md}t_B \text{ soit } v_B = \frac{eU_{PN}}{md}d\sqrt{\frac{2m}{eU_{PN}}}.$$

Or, $U_{PN} = Ed$, ce qui conduit finalement à $v_B = \sqrt{\dfrac{2eEd}{m}}$.

La valeur de $v_B$ est donc

$$v_B = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}6.10^{-19} \times 4{,}0.10^3 \times 0{,}40}{3{,}8.10^{-26}}} = 1{,}2.10^5 \text{ m.s}^{-1}.$$

## Approfondissement

### 23 Plongeur de haut vol

**a.** Le système étudié est Stan, dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

Il ne subit que son poids $\vec{P} = m\vec{g}$.

La masse $m$ étant constante, la deuxième loi de Newton s'écrit $m\vec{a} = \vec{P} = m\vec{g}$.

L'accélération de Stan est donc : $\vec{a} = \vec{g}$.

L'accélération et la vitesse initiale étant toutes deux verticales, le mouvement est rectiligne uniformément varié.

C'est-à-dire $\vec{a} = a_y\vec{j} = +g\vec{j}$ d'où $a_y = \dfrac{dv_y}{dt} = +g$.

Les conditions initiales sont les suivantes : $y(0) = 0$ et $v_y(0) = 0$.

En intégrant, grâce à la condition initiale sur la vitesse, il vient : $v_y(t) = +gt$.

De même, on obtient en intégrant cette dernière expression, en tenant compte de la condition initiale sur la position $y(t) = \dfrac{1}{2}gt^2$.

Le mouvement de Stan est donc vertical rectiligne uniformément accéléré.

À la date $t_E$, Stan atteint l'eau.

Cela se traduit par :

$$y(t_E) = \frac{1}{2}gt_E^2 = h, \text{ d'où } t_E = \sqrt{\frac{2h}{g}}.$$

Donc $t_E = \sqrt{\dfrac{2\times 28}{9{,}8}} = 2{,}4$ s.

Stan dispose de 2,4 s pour exécuter ses figures.

La vitesse $v_E$ en arrivant dans l'eau est :

$$v_E = gt_E = g\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2\times 9{,}8\times 28}$$

$$= 23 \text{ m.s}^{-1} = 83 \text{ km.h}^{-1}.$$

**b.** La vitesse initiale étant horizontale cette fois le vecteur vitesse est donc :

$$\vec{v}\begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = gt \end{cases}$$

L'expression de la vitesse verticale reste la même que dans la chute sans vitesse initiale.

De ce fait la durée de chute reste la même :

$$t_E = \sqrt{\frac{2h}{g}} = 2{,}4 \text{ s}.$$

Par contre la vitesse d'entrée dans l'eau est légèrement supérieure :

$$v_E' = \sqrt{2{,}0^2 + 2\times 9{,}8\times 28} = 24 \text{ m.s}^{-1}.$$

### 24 Influence du poids

Le système étudié est l'électron dans le référentiel terrestre supposé galiléen.

L'électron ne subit que son poids : $\vec{P} = m\vec{g}$

La deuxième loi de Newton s'écrit :

$m\vec{a} = \vec{P} = m\vec{g}$, relation qui se réduit à $\vec{a} = \vec{g}$,

soit $\vec{a}\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \end{cases}$.

L'électron possède à la date $t = 0$ une vitesse initiale horizontale $\vec{v}_0$.

Son mouvement est étudié dans le repère $(0xy)$.

Les conditions initiales sont $x(0) = 0$, $y(0) = 0$ et

$\vec{v}(0)\begin{cases} v_x(0) = v_0 \\ v_y(0) = 0 \end{cases}$.

L'accélération s'écrit $\vec{a} = \dfrac{d\vec{v}}{dt}$ d'où se déduit :

$$\vec{v}(t)\begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = -gt \end{cases}$$

compte tenu des conditions initiales sur la vitesse.

De même $\vec{v} = \dfrac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$ d'où $\overrightarrow{OG}\begin{cases} x = v_0 t \\ y = -\dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases}$

compte tenu des conditions initiales sur la position.

Donc la hauteur de chute de l'électron est :

$h = \dfrac{1}{2}gt^2$, alors que la distance horizontale qu'il parcourt est $L = v_0 t$.

De ce fait, la hauteur de chute est :

$$L = v_0\sqrt{\frac{2h}{g}} = 3{,}0.10^7 \times \sqrt{\frac{2\times 1{,}0.10^{-2}}{9{,}8}} = 1{,}4.10^6 \text{ m}.$$

Donc, pour que la déviation verticale due au poids de l'électron soit de 1,0 cm, il faut qu'il parcoure la distance énorme de $1{,}4.10^3$ km ! On peut donc considérer que à cette vitesse, en l'absence de champ électrostatique, l'électron est en mouvement rectiligne uniforme à la vitesse $\vec{v}_0$ horizontale, la vitesse verticale de chute étant extrêmement faible. Cette propriété est abordée dans l'activité 2 du chapitre.

### 25 À la pétanque

**a.** La portée du tir s'exprimant sous la forme :

$D = \dfrac{v_0^2 \sin(2\alpha)}{g}$, $v_0$ étant constant, il faut déterminer les différents angles donnant la même valeur de $\sin(2\alpha)$.

$$\sin(2\alpha) = D\frac{g}{v_0^2}$$

Sur le cercle trigonométrique, on constate que soit $2\alpha_1$ et $2\alpha_2 = 180° - 2\alpha_1$ ont la même valeur de sinus. Ces angles sont tels que $\alpha_1 + \alpha_2 = 90°$.
Il y a donc pour une certaine valeur $v_0$ de la vitesse initiale deux angles $\alpha_1$ et $\alpha_2$ complémentaires donnant la même portée.

$$\sin(2\alpha) = \frac{8{,}0 \times 9{,}8}{10^2} = 0{,}78$$

La première boule est lancée en tir tendue avec un angle $\alpha_1 = 26°$
La deuxième boule est lancée en cloche avec l'angle complémentaire. Soit $\alpha_2 = 90° - 26° = 64°$.

**b.** La durée du tir tendu est :

$$t_1 = \frac{D}{v_0 \cos\alpha_1} = \frac{8{,}0}{10 \times \cos 26°} = 0{,}89 \text{ s}$$

La durée du tir en cloche est :

$$t_2 = \frac{D}{v_0 \cos\alpha_2} = \frac{8{,}0}{10 \times \cos 64°} = 1{,}8 \text{ s}$$

Bien entendu le tir en cloche a une durée plus longue que le tir tendu pour une même portée.

**c.** La vitesse horizontale du tir tendu ($v_0 \cos 26°$) étant plus grande que la vitesse horizontale du tir en cloche ($v_0 \cos 64°$) la première boule lancée suivant le tir tendu ira plus loin si elle ne percute pas d'autre boule.

## 26 Deux enfants à la piscine

**1.** La trajectoire du ballon étant incurvée, celui-ci ne pourrait atteindre Barbara si elle était restée sue le plongeoir.

**2.a.** Le ballon est étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen muni d'un repère d'espace $(0, \vec{i}, \vec{j})$ d'axes $(0x)$ et $(0y)$ orthonormés.
Dans ce système d'axes, les coordonnées du vecteur vitesse initiale sont :

$$\vec{v}_0 \begin{cases} v_{0x} = v_0 \cos\alpha \\ v_{0y} = v_0 \sin\alpha \end{cases}$$

La balle ne subit que son poids $\vec{P} = m\vec{g}$ La masse $m$ étant constante, la deuxième loi de Newton s'écrit : $m\vec{a} = \vec{P} = m\vec{g}$.
L'accélération de la bille est donc : $\vec{a} = \vec{g}$.
Sachant que $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ et que $\vec{g}\begin{pmatrix} 0 \\ -g \end{pmatrix}$, la deuxième loi de Newton conduit au système suivant :

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt}(t) = 0 \\ \frac{dv_y}{dt}(t) = -g \end{cases}$$

Donc pour obtenir les deux coordonnées du vecteur vitesse, il suffit d'intégrer ces deux équations.
En tenant compte des conditions initiales, le vecteur vitesse du ballon s'exprime donc ainsi :

$$\vec{v} \begin{cases} v_x(t) = v_0 \cos\alpha \\ v_y(t) = -gt + v_0 \sin\alpha \end{cases}$$

Sachant que $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$, où le vecteur position $\overrightarrow{OG}$ a pour coordonnées $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$, ce système d'équations s'écrit également $\vec{v}(t) \begin{cases} \frac{dx}{dt}(t) = v_0 \cos\alpha \\ \frac{dy}{dt}(t) = -gt + v_0 \sin\alpha \end{cases}$

Pour obtenir les coordonnées du vecteur position $\overrightarrow{OG}$, il suffit d'intégrer les équations horaires des coordonnées du vecteur vitesse.
En tenant compte des conditions initiales les équations horaires du mouvement s'écrivent finalement :

$$\overrightarrow{OG}(t) \begin{cases} x = (v_0 \cos\alpha)t \\ y = -\frac{1}{2}gt^2 + (v_0 \sin\alpha)t \end{cases}.$$

L'équation cartésienne s'écrit sous la forme $y = f(x)$ : il s'agit donc d'éliminer la variable temporelle. L'équation horaire $x(t) = (v_0 \cos\alpha)t$ conduit à écrire :

$$t = \frac{x}{v_0 \cos\alpha}$$

En remplaçant $t$ par cette expression dans l'équation horaire de $y$, il vient :

$$y = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 a}x^2 + (\tan\alpha)x \qquad (1)$$

**b.** Le nouveau système étudié est Barbara.
Les conditions initiales de la chute de Barbara sont $y_0 = h$ et $v_0 = 0$.
Cela conduit à un vecteur accélération $\vec{a} = \vec{g}$, un vecteur vitesse de coordonnée unique $v_y = -gt$, et enfin à une coordonnée verticale :

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + h \qquad (2)$$

**3.a.** La rencontre entre le ballon et Barbara a lieu, si c'est le cas, en un point de rencontre R d'ordonnée $y_R$ vérifiant les équations (1) et (2).
Ce qui conduit à : $-\frac{1}{2}gt_R^2 + (v_0 \sin\alpha)t_R = -\frac{1}{2}gt_R^2 + h$,
et donc à la date $t_R = \frac{h}{v_0 \sin\alpha}$.

En introduisant cette date dans l'équation de la coordonnée de Barbara, on obtient :

$$y_R = h\left[-\frac{1}{2}\frac{gh}{v_0^2 \sin^2 a}+1\right]$$

Avec une vitesse initiale $v_0 = 10$ m.s$^{-1}$, on obtient finalement :

$$y_R = 3{,}0\times\left[\frac{-\frac{1}{2}\times 9{,}8\times 3{,}0}{10^2\times \sin^2 30°}+1\right] = 1{,}2 \text{ m}$$

**b.** Barbara n'aurait pas été touchée par la balle dans le cas où $y_R$ aurait été négatif.

Ce qui revient à étudier $-\frac{1}{2}\frac{gh}{v_0^2\sin^2\alpha}+1<0$, ce qui donne la condition $v_0 < \sqrt{\frac{1}{2}\frac{gh}{\sin^2\alpha}}$.

Barbara n'est pas atteinte si $v_0 < 7{,}7$ m.s$^{-1}$.

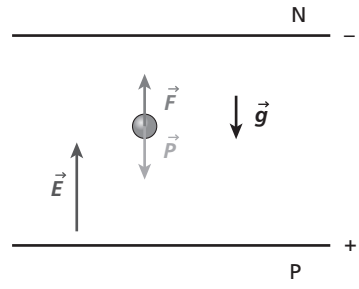
## 27 Boule chargée

**a.** La boule chargée subit son poids $\vec{P} = m\vec{g}$, vertical vers le bas et la force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$, qui elle aussi est verticale puisque les armatures du condensateur sont horizontales.

**b.** Le système étudié dans le référentiel terrestre supposé galiléen est la boule.

D'après la première loi de Newton, la boule étant en mouvement rectiligne uniforme, elle subit des forces qui se compensent. Ce qui se traduit par $\vec{P}+\vec{F}=\vec{0}$, ce qui donne $\vec{P} = -\vec{F}$.

**c.**




**d.** $P = F$, donc $mg = qE$, ce qui donne finalement $mg = \frac{qU_{PN}}{d}$.

La charge de la boule est donc : $q = \frac{mgd}{U_{PN}}$.

Soit, en valeur numérique :

$$q = \frac{1{,}0.10^{-6}\times 10\times 1{,}0.10^{-1}}{1{,}0.10^{3}} = 1{,}0.10^{-9} \text{ C}.$$

## 28 Protons freinés

**a.** Le rapport du poids du proton à la force électrique de charge qu'il subit est : $\frac{P}{F} = \frac{mg}{eE}$.

Sa valeur est $\frac{P}{F} = \frac{1{,}7.10^{-27}\times 9{,}8}{1{,}6.10^{-19}\times 3{,}0.10^{6}} = 3{,}5.10^{-14}$.

Le poids du proton est donc négligeable devant la force électrique qu'il subit.

**b.** Le proton voit sa vitesse diminuer de A vers B. Donc, il subit une force électrique dirigée de B vers A. Sa charge étant positive, sachant que $\vec{F} = q\vec{E}$, il en découle que le champ électrostatique est dirigé des plus grands potentiels vers les plus faibles, soit ici de B vers A.

**c.** On étudie le système proton dans le référentiel terrestre galiléen. Il ne subit que la force électrique $\vec{F}$.

Appliquons la deuxième loi de Newton :

$$m\vec{a} = \vec{F} = q\vec{E}$$

L'accélération est donc $\vec{a} = q\frac{\vec{E}}{m}$. La charge étant positive, l'accélération est donc dans le sens de $\vec{E}$, de B vers A. Sa valeur est $a = \frac{qE}{m}$, soit $a = e\frac{E}{m}$.

L'accélération est constante. De plus, le vecteur accélération est colinéaire au vecteur vitesse initiale $\vec{v}_1$ (orthogonal aux plaques), mais de sens opposé. Donc le mouvement est rectiligne uniformément décéléré.

**d.** Le repère d'espace choisi est $(O_1x)$, l'axe horizontal étant orienté dans le sens du mouvement.

L'origine des dates est choisie au moment où le proton passe en $O_1$.

Le vecteur vitesse s'obtient grâce à $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, ce qui revient ici à $\frac{dv_x}{dt}(t) = -\frac{eE}{m}$. Il vient en intégrant cette relation $v_x = -\frac{eE}{m}t + v_1$ en tenant compte de la condition initiale sur la vitesse.

Or $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$, ce qui revient à écrire $v = \frac{dx}{dt}(t)$.

Or initialement, le proton est en $O_1$, ce qui s'écrit $x(0) = x_0 = 0$.

En tenant compte de la condition initiale sur la position, l'intégration donne alors l'équation horaire du mouvement du proton : $x(t) = -\frac{eE}{m}t^2 + v_1 t$.

**e.** À la date $t_2$, le proton arrive en $O_2$ avec une vitesse nulle, d'où :

$-\frac{eE}{m}t_2 + v_1 = 0$. On en extrait $t_2 = \frac{mv_1}{eE}$, soit

$$t_2 = \frac{1{,}6.10^{5}\times 1{,}7.10^{-27}}{1{,}6.10^{-19}\times 3{,}0.10^{6}} = 5{,}7.10^{-10} \text{ s}.$$

Le proton met donc $5{,}7.10^{-10}$ s pour aller de A à B.

## Exercices de BAC

### 29 Chute verticale d'un boulet

**I.a.** L'équation horaire de la chute s'écrit :

$$x(t) = \frac{1}{2}gt^2$$

Au bout d'une durée $\tau$ de chute, $x_1 = x(\tau) = \frac{1}{2}g\tau^2$.

De même, au bout de $2\tau$,

$x_2 = x(2\tau) = \frac{1}{2}g(2\tau)^2 = 4 \times \frac{1}{2}g\tau^2$.

Et au bout de $3\tau$, $x_2 = x(3\tau) = \frac{1}{2}g(3\tau)^2 = 9 \times \frac{1}{2}g\tau^2$.

**b.** Les différences de hauteur de chute sont :

$h_1 = x_1 - x_0 = \frac{1}{2}g\tau^2 = 1 \times \left(\frac{1}{2}g\tau^2\right)$

$h_2 = x_2 - x_1 = 4 \times \left(\frac{1}{2}g\tau^2\right) - 1 \times \left(\frac{1}{2}g\tau^2\right)$

$= 3 \times \left(\frac{1}{2}g\tau^2\right) = 3h_1$

$h_3 = x_3 - x_2 = 9 \times \left(\frac{1}{2}g\tau^2\right) - 4 \times \left(\frac{1}{2}g\tau^2\right)$

$= 5 \times \left(\frac{1}{2}g\tau^2\right) = 5h_1$

**c.** La suite, comme l'a annoncé Galilée, des hauteurs parcourues en chutant pendant les intervalles de temps $\tau$ successifs est bien égale à un nombre impair de fois $\frac{1}{2}g\tau^2$.

**II.1.** C'est Aristote qui a affirmé que « *la durée de chute diminue quand la masse du boulet augmente* » (proposition **b.**).

C'est Galilée qui a affirmé que « *la durée de chute est indépendante de la masse* » (proposition **c.**).

**2.** Au bout d'une durée $\Delta t$, la hauteur de chute est $H = \frac{1}{2}g(\Delta t)^2$ donc

la durée est $\Delta t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$ soit $\Delta t = \sqrt{\frac{2 \times 57}{9{,}8}} = 3{,}4$ s.

Les expériences effectuées par Galilée donnent des mesures de durée de chute $\Delta t_{exp} = 5$ s.

Dans une chute réelle, il faut tenir compte des frottements de l'air et de la poussée d'Archimède.

De plus la précision des mesures de durées à l'époque était très faible.

### 30 Un service au tennis

**1.a.** La poussée d'Archimède et les forces de frottement étant négligeables, la balle ne subit que son poids, $\vec{P}$ vertical, vers le bas et de valeur $P = 58{,}0.10^{-3} \times 9{,}81 = 0{,}569$ N.

**b.** Dans le référentiel terrestre supposé galiléen, la deuxième loi de Newton appliqué à la balle conduit à : $\vec{P} = m\vec{a}$ soit $m\vec{g} = m\vec{a}$, d'où $\vec{a} = \vec{g}$.

Les coordonnées du vecteur accélération dans le repère $(0xyz)$ sont :

$$\vec{a}\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = -g \\ a_z = 0 \end{cases}$$

**c.** Le vecteur accélération s'écrit $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ donc le vecteur vitesse s'écrit $\vec{v}(t)\begin{cases} v_x = v_0 \\ v_y = -gt \\ v_z = 0 \end{cases}$

compte tenu des conditions initiales sur la vitesse.

Le vecteur vitesse s'écrit $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OM}}{dt}$ par définition.

Cela se traduit par $\vec{v}(t)\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v_0 \\ v_y = \frac{dy}{dt} = -gt \\ v_z = \frac{dz}{dt} = 0 \end{cases}$

et $\overrightarrow{OM}(t)\begin{cases} x(t) = v_0 t \\ y(t) = -\frac{1}{2}gt^2 + H \\ z(t) = 0 \end{cases}$ compte tenu des conditions initiales sur la position, ce qui correspond bien aux expressions demandées.

**d.** À chaque instant, $z(t) = 0$, le mouvement se fait donc dans le plan $(xy)$.

**e.** Pour obtenir l'expression de la trajectoire, la variable date temporelle doit être éliminée en écrivant :

$t = \frac{x}{v_0}$. Il vient $y(x) = -\frac{1}{2}g\left(\frac{x}{v_0}\right)^2 + H$

Finalement l'équation cartésienne de la trajectoire est $y(x) = -\frac{1}{2}\frac{gx^2}{v_0^2} + H$. Ce qui correspond à l'équation d'une parabole de concavité tournée vers le bas, car le coefficient devant $x^2$ est négatif.

**2.a.** Pour que la balle passe au-dessus du filet, il faut que, pour $x = OF = 12{,}2$ m, $y(x) > 0{,}920$ m.

En reprenant l'expression de la trajectoire, il vient,

avec $v_0 = 126$ km.h$^{-1}$ $= \left(\frac{126}{3{,}6}\right)$ m.s$^{-1}$

$y(12{,}2) = 1{,}60$ m $> 0{,}920$ m.

La balle passe donc au-dessus du filet.

**b.** La balle touche le sol au point B′ de coordonnées $\left(x_B' ; y_B' = 0 ; z_B' = 0\right)$.

Le service est raté si $x_B' > \text{OB}$ avec $\text{OB} = L = 18{,}7$ m. Grâce à l'équation de la trajectoire, $x_B'$ peut être déterminé par $y\left(x_B'\right) = -\frac{1}{2}\frac{g x_B'^2}{v_0^2} + H = 0$.

Finalement $x_B' = v_0\sqrt{\frac{2H}{g}}$.

Ce qui donne numériquement :

$x_B' = \left(\frac{126}{3{,}6}\right) \times \sqrt{\frac{2 \times 2{,}20}{9{,}81}}$ soit $x_B' = 23{,}4$ m

qui est supérieur à 18,7 m. Le service est donc *a priori* « mauvais ».

**c.** En réalité, la balle tombe en B car le paramètre frottement avec l'air intervient de manière importante sur la balle de tennis.

*Remarque :* il se produit en réalité l'effet Magnus (non étudié dans le programme) lorsqu'on donne un effet de rotation à la balle. Celle-ci est en fait sûrement « liftée ».

## 31 Principe de l'oscilloscope

**1.a.** Appliquons la deuxième loi de Newton au système {un électron} dans un référentiel terrestre supposé galiléen. L'électron ne subit que la force électrique. Son poids étant négligeable : $m\vec{a} = \vec{F}_{el} = q\vec{E}_0$.

Donc l'accélération est $\vec{a} = \frac{q\vec{E}_0}{m}$.

**b.** $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ d'où $\vec{v} = v_z\vec{k} = \left(\frac{eE}{m}t\right)\vec{k}$, ce qui donne la valeur de la vitesse $v = \frac{eE_0}{m}t$, ou encore $v = \frac{eU_0}{mD}t$, car l'électron est arraché de la cathode C à la date $t' = 0$ avec une vitesse considérée comme nulle.

**c.** Par définition, $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$ d'où, par intégration, $\overrightarrow{OG} = \left(\frac{eU_0}{2mD}t^2\right)\vec{i}$. L'équation horaire du mouvement est ainsi $z = \frac{eU_0}{2mD}t^2$.

**d.** Au niveau de l'anode A, la coordonnée est $z_A = D$. La date $t_A$ est ainsi $t_A = \sqrt{\frac{2mD^2}{eU_0}}$ soit $t_A = D\sqrt{\frac{2m}{eU_0}}$.

Comme $v_A = \frac{ev_0}{md}t_A$, la vitesse s'écrit :

$v_A = \frac{eU}{mD}\sqrt{\frac{2mD^2}{eU_0}}$, soit $v_A = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}$.

**2.a.** D'après le principe d'inertie entre A et O aucune force étant appliquée à l'électron, celui-ci est en mouvement rectiligne uniforme. Donc $v_0 = v_A$.

**b.** La deuxième loi de Newton s'écrit $m\vec{a} = \vec{F}_{el} = -e\vec{E}$ d'où $\vec{a} = \frac{-e\vec{E}}{m}$, puis $a = \frac{eU}{md}$.

L'accélération est donc : $\begin{cases} a_x = 0 \\ a_y = \dfrac{eU}{md} \\ a_z = 0 \end{cases}$

**c.** Changeons d'origine des dates. Les conditions initiales sont maintenant les suivantes : à $t = 0$, l'électron arrive en O avec la vitesse $\vec{v}(0)\begin{cases} v_{0x} = 0 \\ v_{0y} = 0 \\ v_{0z} = v_0 \end{cases}$

et sa position est alors $\overrightarrow{OG}(0)\begin{cases} x(0) = 0 \\ y(0) = 0 \\ z(0) = 0 \end{cases}$.

L'accélération est définie par $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$, donc les coordonnées de la vitesse sont :

$$\vec{v}(t)\begin{cases} v_x(t) = v_{0x} = 0 \\ v_y(t) = +\dfrac{eU}{md}t + v_{0y} = +\dfrac{eU}{md}t \\ v_z(t) = v_{0z} = v_0 \end{cases}$$

en tenant compte des conditions initiales.

**d.** Le vecteur vitesse est défini par $\vec{v} = \frac{d\overrightarrow{OG}}{dt}$ d'où, en tenant compte des conditions initiales, les équations horaires obtenues par intégration :

$$\overrightarrow{OG}(t)\begin{cases} x(t) = x_0 = 0 \\ y(t) = \dfrac{eU}{2md}t^2 + y_0 = \dfrac{eU}{2md}t^2. \\ z(t) = v_0 t \end{cases}$$

**e.** En considérant que $t = \frac{z}{v_0}$, il vient :

$$y = \frac{eU}{2mdv^2}z^2.$$

La trajectoire est donc une portion de parabole dans le plan $(Oxy)$, concavité vers la plaque Y.

**f.** La déviation à la sortie des plaques, pour $z = \ell$ est $y_S = \frac{eU}{2mdv_0^2}\ell^2 = \frac{e\ell^2}{2mdv_0^2}U$.

La déviation $y_S$ est donc bien proportionnelle à $U$.

**g.** Donc en faisant varier $U$, on peut modifier la déviation verticale sur l'écran.

En fait, il faut réaliser une amplification de la tension $U$ pour que la déviation verticale soit mieux mesurable. Celle-ci reste proportionnelle à $U$.

La mesure de la déviation sur l'écran permet donc de déterminer la tension $U$ à mesurer.

**h.** On peut donc faire la même chose sur l'axe des $x$ grâce à une tension appliquée entre les plaques X et X' qui devra elle aussi être amplifiée.

Ceci permettra au spot de couvrir tout l'écran : c'est le rôle du balayage horizontal.

## Rédiger une synthèse de documents

### 32 Accélérateur linéaire

*Analyse de la question*

Il s'agit de mettre en relation la connaissance de la matière et l'accélération de particules dans un accélérateur linéaire ou un canon à électrons. Les documents fournis sont relatifs d'une part à l'étude de l'électron lui-même (mesure historique du rapport $e/m$ par Rutherford) et à des études actuelles de physique des particules. La réponse devra donc aborder ces deux questions.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Principe de l'**accélération linéaire** d'électrons : un schéma montrant le principe du **canon à électrons**, où figurent les vecteurs **champ électrostatique**, **force électrique**, **accélération**, est attendu. Le calcul du cours donnant l'expression de la **vitesse acquise** en fonction de la **tension accélératrice** est bienvenu, pour montrer que la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la tension.

**2.** Évocation de l'**expérience historique** : en accélérant un électron dans un champ électrostatique, et en projetant le faisceau sur un écran, il est possible de mesurer les caractéristiques comme la masse de l'électron et la charge élémentaire.

**3.** Évocation du projet ILC : la projection à des vitesses très élevées de particules chargées les unes sur les autres conduit à des **collisions** créant de nouvelles particules, dont la détection donne des indications sur la **structure de la matière**.

### 33 Plongeons sportifs

*Analyse de la question*

La question demande d'une part d'évoquer les problèmes qui se posent au plongeur (en l'occurrence, la brusque décélération à l'arrivée dans l'eau déformant beaucoup le corps), et d'autre part de vérifier la cohérence entre les données : « plongeon de 28 m » et « arrivée dans l'eau à 90 km.h$^{-1}$ ». La donnée « hauteur record de 53,90 m » ne peut être mise en relation avec aucune autre.

*Pistes de réponses et mots-clefs*

**1.** Vérification de la cohérence des données : il faut s'inspirer de l'exercice 23 p. 184 pour retrouver, sans approche énergétique mais en utilisant l'**équation horaire de la position** et celle de la **vitesse**, la relation $v = \sqrt{2gh}$ reliant la vitesse $v$ d'entrée dans l'eau à la hauteur $h$ de chute. On trouve bien, pour $h = 28$ m, une vitesse $v = 23$ m.s$^{-1}$ = 84 km.h$^{-1}$, ce qui est bien proche de 90 km.h$^{-1}$.

**2.** À l'entrée dans l'eau, le corps subit une forte **décélération** du fait des **frottements fluides** que l'eau exerce sur lui (l'air n'en exerce que très peu) et du fait de la **poussée d'Archimède** exercée par l'eau. Comme le corps humain n'est pas un point mais un objet étendu et non solide, le fait que les parties immergées subissent une décélération alors que les parties émergées chutent à la vitesse $v$ crée une **déformation** du corps, pouvant conduire à des lésions.

Chapitre 7

# Mécanique céleste et mouvements de satellites

## Introduction au chapitre (p. 190)

Ce chapitre est une application du chapitre 5. Les outils de la mécanique sont ici appliqués à la force de gravitation pour faire l'étude du mouvement des satellites ou des planètes.

Le début du chapitre est consacré à la propulsion par réaction, utilisée par les fusées pour envoyer les satellites terrestres en orbite. Vient ensuite l'étude du mouvement d'un satellite en orbite circulaire, pour laquelle les lois de Newton sont utilisées pour connaître notamment la vitesse et la période d'un tel satellite. Enfin, le mouvement d'un satellite ou d'une planète d'orbite non circulaire est décrit de façon générale, en introduisant les trois lois de Kepler.

Le cours du chapitre se termine par une description de la trajectoire de la Terre autour du Soleil.

Les lois de Newton étant appliquées à d'autres études que celle de ce chapitre, le choix de traiter les lois de Kepler en activité a été fait. L'activité expérimentale porte sur la réalisation d'une fusée à eau, car c'est une manipulation simple et ludique, que les élèves peuvent prolonger chez eux.

Les nombreux exercices portent aussi bien sur l'étude des planètes que des satellites. Des exemples connus du grand public (Spot, Hubble, anneaux de Saturne) sont traités, ainsi que des exemples plus spécifiques (satellites de Mars, de Saturne ou de Jupiter).

Le lancement des satellites est également étudié : force de poussée d'une fusée et orbite de transfert.

## Activités

### 1 Les planètes du système solaire (p. 192)

#### *Objectifs*

L'objectif de cette activité est de décrire précisément la trajectoire d'une planète du système solaire, en utilisant les trois lois de Kepler. Une trajectoire circulaire n'étant qu'un cas particulier (ou une approximation), le choix d'étudier des trajectoires elliptiques paraît plus profitable.

La troisième loi de Kepler est ici utilisée en traçant une courbe, puis appliquée à la Lune, pour montrer comment cette loi permet de connaître la masse d'un astre quelconque.

#### *Correspondance avec le programme*

• Démontrer que, dans l'approximation des trajectoires circulaires, le mouvement d'un satellite, d'une planète est uniforme. Établir l'expression de sa vitesse et de sa période.

• Connaître les trois lois de Kepler. Exploiter la troisième loi dans le cas d'un mouvement circulaire.

• Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour interpréter un mode de propulsion par réaction à l'aide d'un bilan qualitatif de quantité de mouvement.

#### *Corrigé*

**a.** Les valeurs de distances minimales et maximales étant différentes, la distance entre une planète et le Soleil n'est pas constante, ce qui confirme que les trajectoires des planètes ne sont pas des cercles : c'est compatible avec la première loi de Kepler.

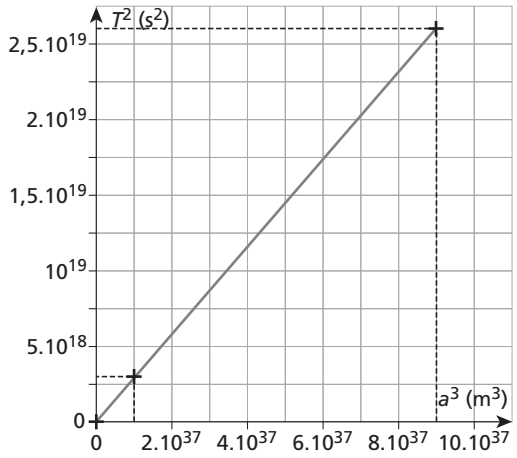
**b.** Le mouvement n'est pas uniforme : la planète accélère en s'approchant du Soleil et ralentit en s'en éloignant. Ainsi la vitesse n'est pas constante sur l'orbite.

Le vecteur accélération n'est pas de valeur constante, mais il est toujours dirigé vers le Soleil. Pour Mercure, de masse $m$ et d'accélération $\vec{a}$ dans le référentiel héliocentrique, la deuxième loi de Newton s'écrit $m\vec{a} = \vec{F}_{S/M}$, où $\vec{F}_{S/M}$ est la force gravitationnelle exercée par le Soleil sur Mercure. Cette force étant parallèle à (SM), orientée vers le Soleil, l'accélération de Mercure tracée sur la **figure 2** est bien conforme à la deuxième loi de Newton.

**c.** D'après la deuxième loi de Kepler, pour que l'aire balayée par le segment reliant le Soleil et la planète soit constante, il faut nécessairement que la vitesse augmente lorsque la distance entre la planète et le Soleil diminue, ce qui est bien en accord avec les résultats de la question précédente.

**d.** et **e.**

| Planète | $a$ (m) | $T^2$ ($s^2$) | $a^3$ ($m^3$) |
|---|---|---|---|
| Jupiter | $7{,}78.10^{11}$ | $1{,}40.10^{17}$ | $4{,}71.10^{35}$ |
| Saturne | $1{,}43.10^{12}$ | $8{,}65.10^{17}$ | $2{,}92.10^{36}$ |
| Uranus | $2{,}87.10^{12}$ | $7{,}08.10^{18}$ | $2{,}36.10^{37}$ |
| Neptune | $4{,}50.10^{12}$ | $2{,}70.10^{19}$ | $9{,}11.10^{37}$ |




Le coefficient directeur de la droite de régression est :

$$C = \frac{(T^2)_B - (T^2)_A}{(a^3)_B - (a^3)_A} = \frac{2{,}6.10^{19} - 3.10^{18}}{8{,}75.10^{37} - 10^{37}}$$
$$= 3{,}0.10^{-19}\ s^2.m^{-3}$$

**f.** La masse du Soleil s'en déduit selon : $\frac{4\pi^2}{GM_S} = C$

donc $M_S = \frac{4\pi^2}{G \times C} = \frac{4\pi^2}{6{,}67.10^{-11} \times 3{,}0.10^{-19}}$
$= 2{,}0.10^{30}$ kg

**g.** Si la constante ne dépend que de la masse de l'astre autour duquel tournent les planètes, il suffit de mesurer la période et le rayon de l'orbite d'un ou de plusieurs satellites d'une planète pour en déduire sa masse.

Ainsi, pour déterminer la masse de la Terre, il faut connaître la trajectoire d'au moins un de ses satellites, comme par exemple la Lune.

Celle-ci ayant une orbite circulaire de rayon $r_{Lune} = 3{,}844.10^8$ m (valeur donnée dans le rabat de couverture du manuel élève), et une période de révolution $T_{Lune} = 2{,}36.10^6$ s (environ 27 jours et 7 heures), la troisième loi de Kepler permet d'écrire $\frac{T_{Lune}^2}{a_{Lune}^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T}$, d'où la masse de la Terre

$$M_{Terre} = \frac{4\pi^2 a_{Lune}^3}{GT_{Lune}^2} = \frac{4\pi^2 \times \left(3{,}844.10^8\right)^3}{6{,}67.10^{-11} \times \left(2{,}36.10^6\right)^2}$$
$$= 6{,}02.10^{24}\ kg.$$

***Commentaires***

• Les trajectoires des planètes ne sont pas, en réalité, dues qu'à la seule attraction du Soleil. Bien que négligeables en première approximation devant l'attraction du Soleil, les forces de gravitation entre les planètes perturbent très légèrement leur mouvement elliptique sur une très grande échelle de temps. Ceci constitue le « *problème à N corps* » qui n'a pas de solution explicite pour $N$ strictement supérieur à 2 (seules des solutions numériques peuvent être obtenues). Les écarts aux ellipses présentées ici sont négligeables sur une échelle de temps égale à leur période. À part pour Mercure, l'approximation d'une orbite quasi circulaire est une bonne approximation, comme on peut le voir avec le tableau de l'activité 1, fournissant les valeurs de périhélie et d'aphélie pour chaque planète. L'excentricité $e$ de l'orbite elliptique d'une planète peut être calculée à partir du périhélie $r_P$ et de l'aphélie $r_A$ selon $e = \frac{r_A - r_P}{r_A + r_P}$.

Si l'orbite est circulaire, l'excentricité vaut 0 exactement. Plus l'excentricité est proche de 1, plus l'orbite est aplatie. Le tableau suivant donne des valeurs d'excentricités orbitales pour les planètes du système solaire et certains objets en orbite autour du Soleil.

| Objet | Excentricité orbitale |
|---|---|
| Mercure | 0,206 |
| Vénus | 0,006 77 |
| Terre | 0,016 7 |
| Mars | 0,093 4 |
| Jupiter | 0,048 4 |
| Saturne | 0,054 2 |
| Uranus | 0,047 2 |
| Pluton | 0,250 |
| Éris | 0,442 |
| Comète de Halley | 0,967 |
| Comète de Hale-Bopp | 0,995 |

• Cette activité peut d'abord faire l'objet d'une recherche d'informations sur les planètes par les élèves. Il est, par exemple, possible de demander aux élèves de se renseigner sur le système solaire, pour savoir ce qu'il contient, comment les planètes ont été découvertes, quelles sont les moyens d'observation, etc.

## 2 La fusée à eau (p. 193)

### *Objectifs*

L'objectif de cette activité est de réaliser un « véhicule » utilisant la propulsion par réaction. L'exemple de la fusée à eau a été choisi car il est simple à réaliser et ne nécessite pas de matériel coûteux : une bouteille en plastique et une pompe à main ou à pied suffisent.

Chaque élève peut même faire l'expérience chez lui, avant ou après la séance de travaux pratiques.

Le but est ici de comprendre comment varie la quantité de mouvement de la fusée, en faisant plusieurs tirs pour différents fluides (eau ou air) dont la vitesse d'éjection est plus ou moins grande.

### *Liste de matériel*

• Bouteilles en plastique de 500 mL.

• Pompe à main ou à pied avec flexible et valve.

• Bouchon en liège.

### *Corrigé*

**a.** Il n'y a aucune action du sol sur la fusée, donc la hauteur du tir est la même quel que soit le support. Le fait que l'eau « appuie » sur le sol après être éjectée de la bouteille n'explique pas le mouvement de la fusée, car ce n'est pas une force s'exerçant sur la fusée.

**b.** En supposant l'ensemble {bouteille + eau} isolé, sa quantité de mouvement est constante, donc nulle, puisque le système est au repos avant le décollage.

**c.** La quantité de mouvement de l'eau étant dirigée vers le bas, celle de la bouteille (et de l'eau qu'elle contient encore) est dirigée vers le haut, d'où la propulsion de celle-ci.

**d.** Dans le cas où la fusée ne contient que de l'air, la quantité de mouvement du fluide éjecté est bien plus faible, car l'air est plus léger que l'eau. Ainsi, la quantité de mouvement de la fusée est également moindre, ce qui diminue la vitesse de la fusée.

**e.** Si la pression permettant l'expulsion de l'embout augmente, la vitesse d'éjection augmente également. Ainsi la quantité de mouvement du fluide éjecté est plus grande, donc la vitesse de la fusée aussi : l'altitude atteinte est supérieure.

**f.** Pour augmenter la vitesse de la fusée, il faut augmenter le débit massique du fluide éjecté (donc utiliser de l'eau plutôt que de l'air), diminuer la masse de la bouteille-fusée, et augmenter la vitesse d'éjection, par exemple en diminuant le diamètre de l'embout.

Ces trois actions permettent à la vitesse de la fusée d'augmenter, soit en augmentant la quantité de mouvement du fluide éjecté, soit en allégeant la fusée, ce qui augmente bien sa vitesse, pour une quantité de mouvement donnée.

### *Commentaires*

• L'étude est ici très simplifiée : la quantité de mouvement de l'ensemble {bouteille + eau} n'est pas constante, car la pesanteur n'est pas négligeable, surtout si la bouteille contient de l'eau. Les frottements de l'air influent aussi sur le mouvement, surtout vers la fin du tir, lorsque la bouteille va vite.

• L'expérience a été réalisée avec une petite bouteille de un demi-litre, dont le poids fait donc au maximum $P = mg = 5$ N.

La force de poussée est $F = D_m u$, où $D_m$ est le débit massique et $u$ la vitesse d'éjection de l'eau (voir l'exercice 25 p. 212 du manuel de l'élève). La bouteille se vidant en environ 5 secondes, le débit massique est $D_m = 0{,}1$ kg.s$^{-1}$.

Comme la section de la valve vaut environ

$$S = 0{,}1 \text{ cm}^2,$$

la vitesse d'éjection a pour valeur approximative :

$$u = \frac{D_m}{\rho S} = \frac{0{,}1}{10^3 \times 0{,}1.10^{-4}} = 10 \text{ m.s}^{-1}.$$

Ainsi la force de poussée est de l'ordre de $F = 1$ N, donc l'approximation selon laquelle la fusée est un système isolé est assez grossière, surtout au début du décollage, et d'autant plus que la quantité d'eau est importante.

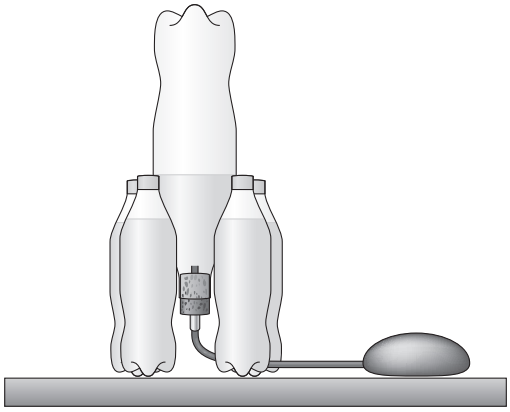
• Les expériences ont été réalisées avec des bouteilles en plastique de 0,5 L. Un simple bouchon en liège, préalablement percé en son centre, a suffi. Il ne faut pas percer un trou trop gros, pour que l'embout de la pompe puisse s'y insérer avec une certaine résistance.

Il est même possible de laisser le bouchon en plastique de la bouteille et d'y percer un trou de

diamètre égal à celui du bouchon de liège si ce dernier n'est pas suffisamment gros (prendre alors un bouchon de bouteille de vin).

La direction du tir est rarement verticale : le mouvement est très sensible à la direction initiale du jet d'eau. La bouteille peut aller dans de multiples directions autour de la verticale.

Le support peut être réalisé simplement avec d'autres bouteilles remplies d'eau, au milieu desquelles la bouteille-fusée sera placée.



## Exercices

## Applications

### 1 Propulsion par réaction

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 627.*

### 2 Poulpe

Le poulpe est un système isolé car soumis à son poids et à la réaction de l'eau dont la somme vectorielle est nulle. Imaginons un poulpe à l'arrêt qui éjecte de l'eau qu'il a au préalable ingérée. Celle-ci ayant une vitesse dirigée vers l'arrière, le poulpe a une vitesse dirigée vers l'avant de sorte que la quantité de mouvement du poulpe et de l'eau éjectée soit nulle.

### 3 Vitesse de recul

**a.** Le pistolet et la balle forment un système de quantité de mouvement initialement nulle.

L'ensemble étant isolé, elle reste nulle après le tir.

En notant $m_{\text{pistolet}}$ la masse du pistolet, $\vec{v}_{\text{recul}}$ la vitesse de recul dans le référentiel terrestre, $m_{\text{balle}}$ la masse de la balle et $\vec{v}_{\text{balle}}$ sa vitesse, cela donne :

$$m_{\text{pistolet}}\vec{v}_{\text{recul}} + m_{\text{balle}}\vec{v}_{\text{balle}} = \vec{0}$$

La quantité de mouvement du pistolet est donc opposée à celle de la balle, et de valeur $p_{\text{pistolet}} = m_{\text{balle}}v_{\text{balle}}$

$$= 2{,}0.10^{-3} \times 300 = 0{,}60 \text{ kg.m.s}^{-1}.$$

La vitesse de recul du pistolet s'en déduit :

$$v_{\text{recul}} = \frac{p_{\text{pistolet}}}{m_{\text{pistolet}}} = \frac{0{,}60}{1{,}0} = 0{,}60 \text{ m.s}^{-1}.$$

**b.** La quantité de mouvement de la balle reste la même, donc celle du fusil également. Le fusil étant quatre fois plus lourd, la vitesse de recul est quatre fois plus faible, soit 0,15 m.s$^{-1}$.

**c.** En épaulant correctement, le tireur devient solidaire du fusil, ce qui augmente considérablement la masse sujette au recul, donc rend la vitesse de recul très proche de zéro.

### 4 Astéroïde

**a.** L'astéroïde seul et la météorite seule ne sont pas des systèmes isolés, car ils subissent une force pendant le choc.

Le système {astéroïde + météorite} est lui isolé car toute force extérieure est négligeable, les autres corps célestes étant suffisamment éloignés.

**b.** Tous les objets étudiés sont en mouvement sur le même axe et dans le même sens.

Il est donc possible d'écrire directement les projections des égalités vectorielles sur cet axe.

En notant $v$ la vitesse de l'astéroïde sur cet axe avant la collision, $v'$ sa vitesse après et $v_0$ celle de la météorite avant la collision, la quantité de mouvement du système {astéroïde + météorite} est, avant la collision, $p = m_1v + m_2v_0$ (la masse de la météorite est notée $m_2$).

Après collision, cette quantité de mouvement n'a pas changé et s'écrit $p = (m_1 + m_2)v'$ et vaut environ $p = m_1v'$.

Il s'en déduit :

$m_1v + m_2v_0 = m_2v'$ d'où $m_1(v' - v) = m_2v_0$.

**c.** La variation de vitesse de l'astéroïde est donc :

$$v' - v = \frac{m_2}{m_1}v_0 = \frac{0{,}20}{1{,}0.10^3} \times 1{,}5.10^3 = 0{,}30 \text{ m.s}^{-1}.$$

### 5 Vitesse orbitale

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 627.*

## 6 Lune

**a.** En notant $M_L$ la masse de la Lune, la deuxième loi de Newton s'écrit, en écrivant l'accélération dans le repère de Frenet : $M_L\left(\frac{dv}{dt}\vec{u}_t + \frac{v^2}{r}\vec{u}_n\right) = \frac{GM_LM_T}{r^2}\vec{u}_n$.

**b.** La valeur de la vitesse de la Lune dans le référentiel géocentrique est notée $v$.

La projection selon la direction tangentielle donne $\frac{dv}{dt} = 0$, donc la valeur de la vitesse est constante : le mouvement est uniforme.

**c.** La projection selon la direction normale fournit :

$$v = \sqrt{\frac{GM_T}{r}}$$

Soit $v = \sqrt{\frac{6{,}67.10^{-11} \times 6{,}0.10^{24}}{3{,}84.10^8}} = 1{,}02.10^3 \text{ m.s}^{-1}$.

## 7 Satellites terrestres

**a.** Le satellite de masse $m$ est étudié dans le référentiel géocentrique, supposé galiléen. Il subit uniquement la force gravitationnelle terrestre. La deuxième loi de Newton s'écrit donc $m\frac{v^2}{r}\vec{u}_n = G\frac{mM_T}{r^2}\vec{u}_n$, où $\vec{u}_n$ est le vecteur normal du repère de Frenet et $v$ la valeur de la vitesse du satellite dans le référentiel géocentrique. Cela permet de calculer la vitesse du satellite $v = \sqrt{\frac{GM_T}{r}}$, d'où une expression de la période :

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_T}}.$$

**b.** La masse de la Terre s'en déduit :

$$M_T = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} = \frac{4\pi^2 \times \left(2{,}0.10^7\right)^3}{6{,}67.10^{-11}\left(7{,}8 \times 3600\right)^2} = 6{,}0.10^{24} \text{ kg}.$$

**c.** La masse de la Terre étant connue, la période $T'$ du deuxième satellite peut se calculer selon

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_T}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{\left((6370+180).10^3\right)^3}{6{,}67.10^{-11} \times 6{,}0.10^{24}}}$$

$= 5{,}3.10^3$ s ou 1,5 h.

## 8 Télescope spatial

**a.** La trajectoire étant circulaire, la force s'exprime dans la base de Frenet selon $\vec{F}_{T/S} = G\frac{m_S M_T}{\left(R_T+h\right)^2}\vec{u}_n$ si $m_S$ est la masse du satellite. D'après la deuxième loi de Newton : $\vec{F}_{T/S} = m_S\vec{a}$ donc $G\frac{M_T}{(R_T+h)^2}\vec{u}_n = \vec{a}$.

**b.** En identifiant la composante normale de l'accélération : $G\frac{M_T}{(R_T+h)^2} = \frac{v^2}{(R_T+h)}$

Donc : $v = \sqrt{G\frac{M_T}{(R_T+h)}}$

**c.** La période est :

$$T = \frac{2\pi(R_T+h)}{v} \text{ donc } T = 2\pi\sqrt{\frac{\left(R_T+h\right)^3}{GM_T}}$$

Numériquement :

$$T = 2\pi \times \sqrt{\frac{\left(6{,}97.10^6\right)^3}{6{,}67.10^{-11} \times 6{,}0.10^{24}}} = 5{,}8.10^3 \text{ s}.$$

En un jour solaire, soit 86 400 s, Hubble fait donc $\frac{86400}{5{,}8.10^3} = 15$ tours autour de la Terre.

## 9 Trajectoires de satellites

**a.** La deuxième figure est incompatible avec la première loi de Kepler, car la Terre n'est pas au centre du cercle de l'orbite. Elle est également incompatible avec la deuxième loi de Newton, puisque le vecteur accélération ne passe pas par le centre de la Terre. Les deux autres trajectoires sont compatibles avec les lois de la mécanique.

**b.** La première trajectoire est contenue dans le plan équatorial, donc peut correspondre à l'orbite d'un satellite géostationnaire.

## 10 Satellite en orbite rasante

**a.** La troisième loi de Kepler s'écrit $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$.

Le satellite artificiel, dont l'orbite de rayon $r_S = R_T$ est parcourue avec une période $T_S$, et la Lune, dont l'orbite de rayon $r_L = 60R_T$ est parcourue avec la période $T_L$, tournent tous les deux autour de la Terre, donc $\frac{T_L^2}{r_L^3} = \frac{T_S^2}{r_S^3}$.

**b.** D'où $T_S^2 = T_L^2 \times \frac{r_S^3}{r_L^3}$, ce qui donne :

$$T_S = T_L \times \left(\frac{r_S}{r_L}\right)^{\frac{3}{2}} = T_L \times \left(\frac{R_T}{60R_T}\right)^{\frac{3}{2}} = 2{,}1.10^{-3}\,T_L,$$

ou $T_S = 2{,}1.10^{-3} \times 27{,}32 \times 24 \times 3600 = 5{,}1.10^3$ s, soit 1,4 heures.

**c.** La trajectoire étant circulaire, la distance entre entre le satellite et le centre de la Terre est constante. L'aire balayée par le segment reliant la Terre au satellite étant constante pour des intervalles de temps identiques, on peut en déduire que l'orbite est parcourue avec une vitesse constante.

### 11 Satellites de Mars

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 627.*

### 12 Satellites de Saturne

**a.** La troisième loi de Kepler s'écrit $\frac{T^2}{r^3} = \text{constante}$.

$T^2$, $r^3$ et leur quotient sont regroupés dans le tableau ci-dessous. Le rapport $\frac{T^2}{r^3}$ est bien constant.

**b.**

| Satellite | $T$ (jours) | $R$ ($10^6$ km) | $T^2$ (jour)$^2$ | $r^3$ ($10^{18}$ km$^3$) | $T^2/r^3$ $10^{-18}$ (jour)$^2$.km$^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Encelade | 1,37 | 0,238 | 1,88 | 0,0135 | 139 |
| Téthys | 1,89 | 0,295 | 3,57 | 0,0257 | 139 |
| Dioné | 2,74 | 0,377 | 7,51 | 0,0536 | 140 |
| Rhéa | 4,52 | 0,527 | 20,43 | 0,146 | 140 |
| Titan | 15,95 | 1,222 | 254,4 | 1,825 | 139,4 |
| Japet | 79,33 | 3,561 | 6 293 | 45,16 | 139,4 |

**c.** En prenant une valeur du rapport égale à 139,5 (jour)$^2$.$10^{-18}$ km$^{-3}$, le calcul de la période de révolution du satellite Atlas s'en déduit :

$\frac{T^2}{r^3} = 139{,}5$ d'où $T = \sqrt{139{,}5 \times (0{,}138)^3} = 0{,}61$ jour.

## Entraînement

### 13 Système solaire

**a.** La deuxième loi de Newton appliquée à une planète, de masse $m$ et d'orbite circulaire de rayon $r$, dans le référentiel héliocentrique donne, en utilisant le repère de Frenet : $\vec{F} = G\frac{mM_S}{r^2}\vec{u}_n = m\vec{a} = m\frac{v^2}{r}\vec{u}_n$, ce qui permet d'en déduire la vitesse : $v = \sqrt{\frac{GM_S}{r}}$.

Le calcul de la période s'en déduit selon :

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM_S}} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_S}} \text{ soit } \frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S}.$$

**b.** La masse du Soleil est alors $M_S = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$

Soit numériquement :

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (1{,}496.10^{11})^3}{6{,}67.10^{-11} \times (365{,}25 \times 86\,400)^2} = 1{,}99.10^{30} \text{ kg}$$

**c.** En calculant le rayon de chaque orbite avec la relation $r = \sqrt[3]{\frac{GM_S}{4\pi^2}T^2}$ cela donne $r = r_0\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{2}{3}}$.

Le rayon de l'orbite en unités astronomiques s'obtient en faisant le calcul avec $r_0 = 1$ U.A. par définition.

| Planète | Rayon (U.A.) |
|---|---|
| Vénus | 0,722 |
| Jupiter | 5,21 |
| Saturne | 9,56 |
| Uranus | 19,3 |
| Neptune | 30,1 |

### 14 Masse du Soleil

**a.** En appliquant la deuxième loi de Newton à la Terre dans le référentiel héliocentrique et en exprimant l'égalité dans le repère de Frenet, on a :

$$M_T\left(\frac{dv}{dt}\vec{u}_t + \frac{v^2}{r}\vec{u}_n\right) = \frac{GM_SM_T}{r^2}\vec{u}_n.$$

La coordonnée selon $\vec{u_t}$ est nulle, donc $\frac{dv}{dt} = 0$ : la valeur de la vitesse est constante.

**b.** En identifiant les composantes normales : $M_T\frac{v^2}{r} = \frac{GM_SM_T}{r^2}$, donc la vitesse vaut $v = \sqrt{\frac{GM_S}{r}}$.

**c.** La période de révolution est :

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM_S}} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_S}}$$

**d.** En isolant la masse du Soleil à partir de l'expression de la vitesse : $M_S = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2}$, soit :

$$M_S = \frac{4\pi^2 \times (1{,}496.10^{11})^3}{6{,}67.10^{-11} \times (365{,}25 \times 86\,400)^2} = 1{,}99.10^{30} \text{ kg}.$$

### 15 Satellite géostationnaire

**a.** La deuxième loi de Newton appliquée au satellite de masse $m$ dans le référentiel géocentrique s'écrit, dans le repère de Frenet, $G\frac{mM_T}{r^2}\vec{u}_n = m\frac{v^2}{r}\vec{u}_n$, ce qui permet d'obtenir la vitesse d'un satellite en fonction du rayon de l'orbite $v = \sqrt{\frac{GM_T}{r}}$ soit $v = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$.

Elle est indépendante de la masse du satellite.

**b.** La période étant $T = \frac{2\pi r}{v}$, elle s'exprime selon :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM_T}} \text{ ou encore } T = 2\pi\sqrt{\frac{(R_T + h)^3}{GM_T}}$$

**c.** Pour un satellite géosynchrone, $T = 86\,164$ s, donc :

$$h = \left(GM_T\frac{T^2}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}} - R_T,$$

Ce qui donne :

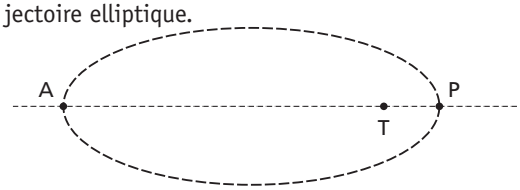
$$h = \left(6{,}67.10^{-11} \times 6.10^{24} \times \frac{(86164)^2}{4\pi^2}\right)^{\frac{1}{3}} - 6{,}37.10^6$$

$= 3{,}6.10^7$ m (environ 36 000 km).

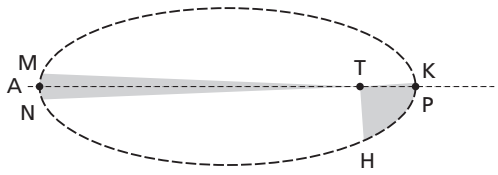
**d.** Un satellite géostationnaire est fixe par rapport à la Terre : il est situé au-dessus d'un même point de la surface terrestre. Le plan de l'orbite doit alors être le plan de l'équateur, et le satellite tourne dans le même sens que la Terre.

### 16 Lancement raté

**a.** et **b.** La Terre occupe l'un des foyers de la trajectoire elliptique.




**c.**




Sur le dessin, on suppose que les positions M et N sont occupées par le satellite pendant un intervalle de temps donné et que le même intervalle de temps sépare les positions H et K. D'après la deuxième loi de Kepler, les deux portions de surface grisées ont la même aire. La distance HK étant supérieure à la distance MN, les vitesses ne peuvent être les mêmes pour que les aires hachurées soient égales.

La vitesse est minimale en A (distance maximale) et maximale en P (distance minimale).

### 17 Planètes du système solaire

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 627.*

### 18 Lancement d'un satellite géostationnaire

**a.** Les satellites sont fixes par rapport à la Terre, car leur période de révolution est exactement égale au jour sidéral (période de rotation propre de la Terre).

**b.** La période de révolution étant indépendante de la masse du satellite, elle ne dépend que de l'altitude (d'après la troisième loi de Kepler), ce qui explique que tous les satellites géostationnaires se trouvent à $3{,}58.10^4$ km d'altitude.

**c.** Pour qu'un satellite soit immobile par rapport à la Terre, sa période de révolution doit être la même que celle de la Terre.

L'axe de son orbite doit être confondu avec l'axe de rotation de la Terre, ce qui impose une orbite dans le plan équatorial. Son orbite est nécessairement circulaire, sinon sa hauteur au-dessus du sol varierait.

**d.** L'augmentation de la quantité de mouvement du satellite, par la perte d'un étage inférieur de la fusée ou l'éjection de gaz, fait augmenter la vitesse du satellite qui peut alors rejoindre une orbite de plus grande altitude.

**e.** Pour l'orbite de transfert, le périgée correspond à (6 370 + 200) km, et l'apogée à (6 370 + $3{,}58.10^4$) km, donc le demi grand axe est :

$$a = \frac{(6370 + 200) + (6370 + 3{,}58.10^4)}{2} = 2{,}44.10^4 \text{ km}.$$

La troisième loi de Kepler s'écrit $\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_T}$ donc

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{a^3}{GM_T}} = 2\pi \times \sqrt{\frac{\left(2{,}44.10^7\right)^3}{6{,}67.10^{-11} \times 6{,}0.10^{24}}} = 3{,}8.10^4 \text{ s}.$$

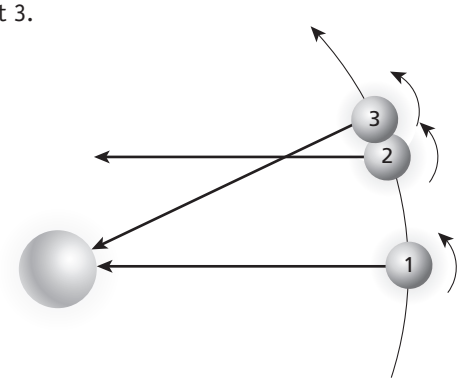
La durée du transfert est d'environ 5,2 heures (c'est la moitié de la période).

## Approfondissement

### 19 Jour solaire et jour sidéral

**a.** Du fait de la double rotation de la Terre, sur elle-même et autour du Soleil, le Soleil n'est pas encore à la verticale du lieu au bout d'un jour sidéral. Il faut un peu plus d'un tour de la Terre sur elle-même pour atteindre le jour solaire.

Sur le dessin, un jour sidéral s'écoule entre les positions 1 et 2, et un jour solaire entre les positions 1 et 3.




**b.** L'année ayant 365,25 jours solaires, la différence de durée entre le jour sidéral et le jour solaire est de $\frac{1}{365{,}256}$ jour sidéral, ce qui correspond à la rotation supplémentaire de la Terre (par rapport à un tour) pour que le Soleil se retrouve au méridien.

Ainsi $J = J_S + \dfrac{J_S}{365{,}256}$

ou $365{,}256\ J = 365{,}256\ J_S + J_S = 366{,}256\ J_S$.

**c.** En secondes $J = 24 \times 60 \times 60 = 86\,400$ s, donc :

$$J_S = \frac{365{,}256}{366{,}256} \times 86\,400 = 86\,164 \text{ s}$$

Avec $86\,164 = 23 \times 3\,600 + 56 \times 60 + 4$,

un jour sidéral dure 23 heures, 56 minutes et 4 secondes.

## 20 Anneaux et satellites de Saturne

**a.** L'application de la troisième loi de Kepler permet de calculer la période $T_{int}$ de révolution du satellite « gardien interne » en connaissant les caractéristiques du mouvement de Titan :

$$\left(\frac{a}{r}\right)^3 = \left(\frac{T_{int}}{T}\right)^2 \text{ donc } T_{int} = T \times \left(\frac{a}{r}\right)^{\frac{3}{2}}$$

soit $T_{int} = 15{,}9 \times \left(\dfrac{139400}{1{,}22.10^6}\right)^{\frac{3}{2}} = 0{,}614$ jour.

**b.** Le rayon de l'orbite du « gardien externe » étant différent, sa période de révolution $T_{ext}$ est différente de $T_{int}$.

Un calcul identique au précédent donne :

$$T_{ext} = T\left(\frac{a'}{r}\right)^{\frac{3}{2}} = 15{,}9 \times \left(\frac{141\,700}{1{,}22.10^6}\right)^{\frac{3}{2}} = 0{,}629 \text{ jour.}$$

**c.** La loi de Kepler permet également de calculer les rayons $r_A$ et $r_B$ des orbites des bords de la division Cassini, connaissant les périodes de révolution $T_A$ et $T_B$ :

$$r_B = r\left(\frac{T_B}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 1{,}22.10^6 \times \left(\frac{11{,}41}{15{,}9 \times 24}\right)^{\frac{2}{3}} = 1{,}18.10^5 \text{m}$$

$$r_A = r\left(\frac{T_A}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 1{,}22.10^6 \times \left(\frac{11{,}93}{15{,}9 \times 24}\right)^{\frac{2}{3}} = 1{,}21.10^5 \text{m}$$

soit une largeur d'environ $3.10^3$ m pour la division de Cassini.

**d.** La période des différents éléments étant différentes, les anneaux ne tournent pas en bloc, les différentes parties glissent les une par rapport aux autres. De plus une partie de l'anneau n'est pas suffisamment loin d'une autre pour que la force gravitationnelle soit négligeable, les anneaux peuvent donc se déformer.

**e.** Pour le satellite Mimas :

$$T' = T \times \left(\frac{r'}{r}\right)^{\frac{3}{2}} = 15{,}9 \times \left(\frac{1{,}860.10^5}{1{,}22.10^6}\right)^{\frac{3}{2}} = 0{,}947 \text{ jour.}$$

## 21 Orbites circulaires ?

**a.** La distance entre la Terre et le centre du Soleil n'est pas constante, donc la vitesse non plus d'après la deuxième loi de Kepler (loi des aires). La vitesse est maximale si la distance est minimale (donc au périhélie), elle est minimale si la distance est maximale (à l'aphélie).

**b.** Le demi-grand axe $a$ est tel que $2a = r_P + r_A$, donc $a = \dfrac{r_P + r_A}{2} = 149{,}6.10^6$ km.

La vitesse moyenne est :

$$v_{moy} = \frac{2\pi a}{T} = \frac{2\pi \times 149{,}6.10^9}{365{,}25 \times 86400} = 2{,}979.10^4 \text{ m.s}^{-1}.$$

**c.** Pour calculer $v_P$ et $v_A$, on utilise la relation :

$$\begin{cases} v_P = \dfrac{a v_{moy}}{r_P} = \dfrac{1{,}496.10^{11} \times 2{,}979.10^4}{1{,}471.10^{11}} = 3{,}029.10^4 \text{m.s}^{-1} \\ v_A = \dfrac{a v_{moy}}{r_A} = \dfrac{1{,}496.10^{11} \times 2{,}979.10^4}{1{,}521.10^{11}} = 2{,}930.10^4 \text{m.s}^{-1} \end{cases}$$

Les variations de vitesse sont très faibles sur une année.

**d.** La troisième loi de Kepler permet d'écrire que le quotient du carré de la période de révolution d'un objet céleste autour du Soleil par le cube du demi grand-axe de son orbite est indépendant de l'objet considéré, donc égal à $\dfrac{T^2}{a^3}$ (pour la Terre en révolution autour du Soleil). Ainsi, pour la comète de Halley, de période de révolution $T_c = 76$ ans et de demi grand-axe $a_c$, on peut écrire $\dfrac{T^2}{a^3} = \dfrac{T_c^2}{a_c^3}$, soit

$$a_c = a\left(\frac{T_c}{T}\right)^{\frac{2}{3}} = 149{,}6.10^6 \times \left(\frac{76}{1}\right)^{\frac{2}{3}} = 2{,}7.10^9 \text{ km,}$$

soit 2,7 milliards de kilomètres.

**e.** Le périhélie de la comète de Halley est bien plus faible que son demi-grand axe (contrairement à ce qui se passe pour la Terre), donc sa trajectoire n'est pas circulaire, c'est une ellipse très aplatie.

## 22 Les satellites de Jupiter

**a.** En utilisant la deuxième loi de Newton et le repère de Frenet dans le référentiel galiléen défini :

$$m\left(\frac{dv}{dt}\vec{u}_t + \frac{v^2}{r}\vec{u}_n\right) = \frac{GmM_J}{r^2}\vec{u}_n.$$

En projection sur le vecteur $\vec{u}_t$, cela donne $\dfrac{dv}{dt} = 0$, donc le mouvement est circulaire uniforme.

**b.** La vitesse se calcule en identifiant les composantes normales : $v = \sqrt{\dfrac{GM_J}{r}}$.

La période étant $T = \dfrac{2\pi r}{v}$, elle vaut, en reportant l'expression de la vitesse : $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{r^3}{GM_J}}$.

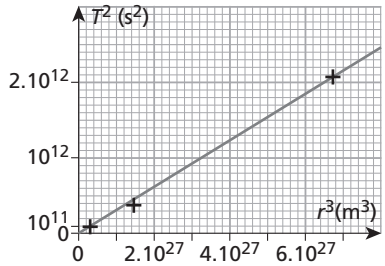
**c.** Le résultat précédent s'écrit aussi, en élevant au carré : $T^2 = \dfrac{4\pi^2 r^3}{GM_J}$ ce qui donne $\dfrac{T^2}{r^3} = \dfrac{4\pi^2}{GM_J} = \text{cste}$.

Ce résultat est la troisième loi de Kepler.

**d.** En calculant $T$ en secondes et $r$ en mètres :

| Satellite | Io | Europe | Ganymède | Callisto |
|---|---|---|---|---|
| $T^2$ ($s^2$) | $2{,}34.10^{10}$ | $9{,}41.10^{10}$ | $3{,}82.10^{11}$ | $2{,}08.10^{12}$ |
| $r^3$ ($m^3$) | $7{,}52.10^{25}$ | $3{,}02.10^{26}$ | $1{,}23.10^{27}$ | $6{,}73.10^{27}$ |

Le tracé donne une droite passant par l'origine.




**e.** Le coefficient directeur de la droite de régression est $3{,}1.10^{-16}$ $s^2.m^{-3}$.

D'après la question **b.**, il est égal à $\dfrac{4\pi^2}{GM_J}$

Donc $\dfrac{4\pi^2}{GM_J} = 3{,}1.10^{-16}$

Soit $M_J = \dfrac{4\pi^2}{6{,}67.10^{-11} \times 3{,}1.10^{-16}} = 1{,}9.10^{27}$ kg.

**f.** Pour le satellite Métis, dont la période est de 7,07 heures ou $2{,}55.10^4$ s, le rayon orbital est :

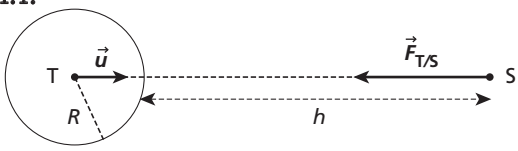
$$r = \sqrt[3]{\frac{GM_J}{4\pi^2}T^2} = \sqrt[3]{\frac{6{,}67.10^{-11} \times 1{,}9.10^{27}}{4\pi^2} \times \left(2{,}55.10^4\right)^2}$$

$= 1{,}3.10^8$ m.

## Exercices de BAC

### 23 Étude de satellites d'observation

**I.1.**




$\vec{F}_{T/S} = -G\dfrac{mM}{(R+h)^2}\vec{u}$

$F_{T/S} = 6{,}67.10^{-11} \times \dfrac{8200 \times 5{,}98.10^{24}}{\left(6{,}38.10^6 + 800.10^3\right)^2} = 6{,}34.10^4$ N

**2.** La deuxième loi de Newton appliquée au satellite dans le référentiel géocentrique s'écrit $\vec{F}_{T/S} = m\vec{a}$ donc l'accélération du satellite s'écrit :

$$\vec{a} = -G\frac{M}{(R+h)^2}\vec{u}$$

**3.** Dans le cas d'un mouvement circulaire uniforme, $\vec{a} = -\dfrac{v^2}{(R+h)}\vec{u}$, donc $\dfrac{v^2}{(R+h)} = \dfrac{GM}{(R+h)^2}$

d'où $v = \sqrt{\dfrac{GM}{R+h}}$.

**4.** $v = \sqrt{\dfrac{6{,}67.10^{-11} \times 5{,}98.10^{24}}{6{,}38.10^6 + 800.10^3}} = 7{,}45.10^3$ $m.s^{-1}$

$= 7{,}45$ $km.s^{-1}$.

**5.** Le périmètre de l'orbite du satellite est $2\pi(R+h)$ donc sa période de révolution est $T = \dfrac{2\pi(R+h)}{v}$.

Numériquement :

$$T = \frac{2\pi \times \left(6{,}38.10^6 + 800.10^3\right)}{7{,}45.10^3} = 6{,}05.10^3 \text{ s.}$$

**II.1.** Pour être géostationnaire, un satellite doit avoir une période $T$ égale à la période de rotation propre de la Terre.

**2.** D'après la question **1.5**, $T^2 = \dfrac{4\pi^2(R+h)^2}{v^2}$, et d'après la question **1.3**, $v^2 = \dfrac{GM}{R+h}$ donc en reportant $T^2 = \dfrac{4\pi^2(R+h)^3}{GM}$ soit $\dfrac{T^2}{(R+h)^3} = \dfrac{4\pi^2}{GM} = K$.

Cela donne :

$$K = \frac{4\pi^2}{6{,}67.10^{-11} \times 5{,}98.10^{24}} = 9{,}90.10^{-14} \text{ SI.}$$

**3.** La relation précédente s'écrit : $R + H = \left(\dfrac{T_{propre}}{K}\right)^{\frac{1}{3}}$

où $T_{propre}$ est la période de rotation propre de la Terre.

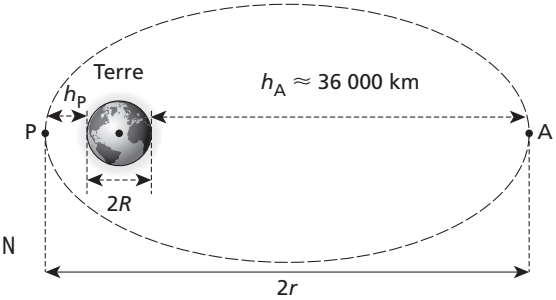
Avec $T_{propre} = 1\,436$ min $= 8{,}616.10^4$ s,

$$R + H = \left(\frac{(8{,}616.10^4)^2}{9{,}90.10^{-14}}\right)^{\frac{1}{3}} = 4{,}22.10^7 \text{ m}$$

$= 4{,}22.10^4$ km.

D'où $H = 4{,}22.10^4 - 6{,}38.10^3 = 3{,}58.10^4$ km.

**4.a.**



D'après le schéma : $2r = 2R + h_P + h_A$.

Soit $r = \dfrac{200 + 2 \times 6{,}38.10^3 + 36\,000}{2} = 24\,480$ km.

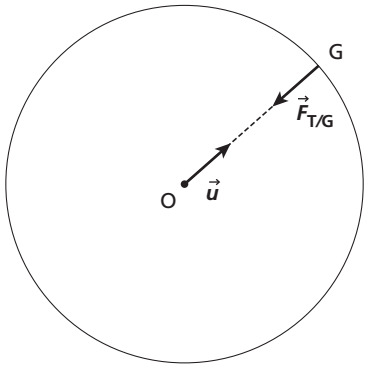
**b.** En utilisant le résultat de la question **II.2.**, la période de révolution du satellite sur l'orbite de transfert est :

$T = \sqrt{Kr^3} = \sqrt{9{,}90.10^{-14} \times (24\,480.10^3)^3} = 3{,}81.10^4$ s

soit un peu plus de dix heures.

## 24 Galiléo

**I.1.a.** On obtient la figure suivante.




**b.** $\vec{F}_{T/G} = -G\dfrac{m_{sat}M_T}{(R_T + h)^2}\vec{u}$

**2.a.** Le mouvement du satellite est décrit dans le référentiel géocentrique.

**b.** Il faut faire l'hypothèse que le référentiel géocentrique peut être considéré comme galiléen pour appliquer la deuxième loi de Newton.

**c.** La deuxième loi de Newton appliquée au satellite, dans le référentiel géocentrique, s'écrit $\vec{F}_{T/G} = m_{sat}\vec{a}$ donc l'accélération du satellite est :

$$\vec{a} = -G\frac{M_T}{(R_T + h)^2}\vec{u}.$$

**3.** Pour un mouvement circulaire uniforme le vecteur accélération $\vec{a}$ est parallèle à (OG) et orienté de G vers O. Il a pour valeur $a = \dfrac{v^2}{R_T + h} = \dfrac{v^2}{R}$.

En utilisant le résultat de la question **I.2.c.**, il vient $a = \dfrac{v^2}{R} = G\dfrac{M_T}{R^2}$, donc $v^2 = \dfrac{GM_T}{R}$.

**4.a.** La période de révolution $T$ du satellite est la durée qu'il met pour parcourir son orbite. Elle vérifie donc $T = \dfrac{2\pi R}{v}$. En utilisant l'expression précédente de la vitesse, il vient :

$$T = \frac{2\pi R}{\sqrt{\dfrac{GM_T}{R}}} = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM_T}} = \sqrt{\frac{4\pi^2R^3}{GM_T}}$$

**b.**

$$T = \sqrt{\frac{4\pi^2 \times \left((6{,}38.10^3 + 23{,}6.10^3) \times 10^3\right)^3}{6{,}67.10^{-11} \times 5{,}98.10^{24}}} = 5{,}16.10^4 \text{ s}$$

**II.1.** La courbe donnant $T^2$ en fonction de $R^3$ étant une droite passant par l'origine, on peut en déduire que $T^2$ est proportionnelle à $R^3$.

**2.** D'après la question **I.4.a.** $T = \sqrt{\dfrac{4\pi^2R^3}{GM_T}}$, soit $T^2 = \dfrac{4\pi^2R^3}{GM_T}$ ou encore $\dfrac{T^2}{R^3} = \dfrac{4\pi^2}{GM_T} = K$,

$K$ étant une constante égale à :

$$K = \frac{4\pi^2}{6{,}67.10^{-11} \times 5{,}98.10^{24}} = 9{,}90.10^{-14} \text{ s}^2\text{m}^{-3}.$$

Cette constante est aussi le coefficient directeur de la droite, qui se mesure graphiquement :

$$K = \frac{T_B^2 - T_A^2}{R_B^3 - R_A^3} = \frac{70.10^8 - 0}{7.10^{22} - 0} = 1.10^{-13} \text{ s}^2.\text{m}^{-3},$$

soit une valeur très proche de la valeur précédente. Le résultat précédent est bien conforme au tracé.

## 25 Décollage de la fusée Ariane 5

**1.a.** La masse du combustible diminue au cours du temps, donc il faut préciser pour quel instant la valeur est donnée.

**b.** L'éjection des gaz permet la mise en mouvement de la fusée.

**c.** La propulsion de la fusée est possible tant qu'il reste du combustible, donc elle ne peut pas s'élever à n'importe quelle altitude.

**2.a.** La masse de gaz éjectés est $m_g(t) = M - m(t)$.

**b.** La quantité de mouvement de la fusée à une date $t$ est $m(t)\vec{v}(t)$.

**c.** Celle des gaz éjectés est $m_g(t)\left(\vec{v}(t) + \vec{u}\right)$.

**d.** La quantité de mouvement de l'ensemble constitué de la fusée et des gaz éjectés est donc la somme de ces deux quantités de mouvement, soit :

$\vec{p}(t) = m(t)\vec{v}(t) + m_g(t)\left(\vec{v}(t) + \vec{u}\right) = M\vec{v}(t) + m_g(t)\vec{u}$.

Cette quantité de mouvement est constante car le système est isolé.

**e.** La dérivée de cette quantité de mouvement est donc nulle : $\dfrac{d\vec{p}}{dt} = \vec{0} = M\dfrac{d\vec{v}}{dt} + \dfrac{dm_g}{dt}\vec{u}$.

Il s'en déduit donc $M\dfrac{d\vec{v}}{dt} = -\dfrac{dm_g}{dt}\vec{u}$.

**f.** $D_m$ est positif car les gaz sortent de la fusée, donc la masse $m_g$ de gaz éjectés augmente.

**g.** $\left[\dfrac{\mathrm{d}m_\mathrm{g}}{\mathrm{d}t}u\right] = \dfrac{\mathrm{MLT}^{-1}}{\mathrm{T}} = \mathrm{MLT}^{-2}$.

L'expression est bien homogène à une force.

Cette force est orientée dans le sens du mouvement de la fusée : en effet, elle est de sens opposé à $\vec{u}$, vitesse d'éjection des gaz, verticale et vers le bas. La force de poussée est donc verticale et vers le haut.

**3.a.** L'expression de la quantité de mouvement est inchangée, mais elle n'est plus constante car le système, soumis au poids, n'est plus isolé.

**b.** La deuxième loi de Newton s'écrit à présent $\dfrac{\mathrm{d}\vec{p}}{\mathrm{d}t} = M\vec{g}$, ce qui donne $M\dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} + \dfrac{\mathrm{d}m_\mathrm{g}}{\mathrm{d}t}\vec{u} = M\vec{g}$.

Soit : $M\dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t} = M\vec{g} - D_\mathrm{m}\vec{u}$.

**c.** La fusée peut décoller si l'accélération est dirigée vers le haut, donc si $D_\mathrm{m}u > Mg$.

Le débit minimum est donc :

$$D_\mathrm{m} = \frac{Mg}{u} = \frac{1100.10^3 \times 9{,}8}{5000} = 2{,}2.10^3 \text{ kg.s}^{-1}.$$

**d.** Si $M_\mathrm{c}$ est la masse initiale de combustible, alors ce débit massique s'écrit aussi $D_\mathrm{m} = \dfrac{M_\mathrm{c}}{T}$.

Donc la durée du décollage correspondante est :

$$T = \frac{M_\mathrm{c}}{D_\mathrm{m}} = \frac{1000.10^3}{2{,}2.10^3} = 4{,}6.10^2 \text{ s},$$

soit 7 minutes et 40 secondes.

## Rédiger une synthèse de documents

### 26 Satellites artificiels terrestres

*Analyse de la question*

La question demande de faire le lien entre les utilisations des satellites et leurs altitudes. Elle invite à utiliser le paragraphe 2.4 du cours, qui présente les satellites terrestres et mentionne plus particulièrement les satellites géostationnaires, ainsi que le document 2 p. 213, qui traite des satellites du système GPS. Elle nécessite donc d'une part de préciser les diverses utilisations d'un satellite pour, d'autre part, en déduire les implications qu'ont ces utilisations sur les orbites et, notamment, leur altitude.

*Pistes de réponses et mots-clés*

Il faut rappeler le lien entre **période de révolution** (et vitesse) d'un satellite et la **taille de son orbite**. Pour cela, il est possible d'utiliser la **deuxième loi de Newton** comme dans le paragraphe 2.4 du cours, en montrant le lien entre période et altitude pour les satellites en **orbite circulaire**, puis la **troisième loi de Kepler** pour généraliser le résultat à toutes les orbites elliptiques.

Il est possible de passer en revue les différents types de satellites connus en précisant leurs caractéristiques et leurs justifications. L'implication immédiate sur la période de révolution du satellite doit être évoquée.

Les **satellites géostationnaires** utilisés en télécommunications sont **fixes dans le référentiel terrestre** de manière à permettre d'orienter en permanence les récepteurs au sol dans une direction donnée. Leur période de révolution est donc la période de **rotation propre** de la Terre.

Les satellites utilisés pour le **système GPS** doivent être au moins trois en permanence en vue d'un même point de la Terre. Il faut donc de nombreux satellites. Mais s'ils sont positionnés trop bas, ils couvrent une zone de la Terre trop étroite. Un moyen terme doit donc être choisi, ce qui implique en l'occurrence une période de la moitié d'un jour sidéral (donc ces satellites reviennent au même point dans le référentiel terrestre au bout d'un jour sidéral).

Les **satellites de météorologie ou d'observation** (comme les satellites SPOT) doivent pouvoir prendre des images précises de la Terre et avoir une période bien inférieure à la journée.

Reste à conclure par un résumé décrivant le raisonnement : l'utilisation du satellite a des implications sur sa période de révolution donc sur l'altitude de son orbite.

Chapitre 8

# Travail et énergie mécanique

## Introduction au chapitre (p. 214)

Ce chapitre traite d'abord du travail d'une force qui représente un transfert d'énergie. Ensuite, il s'intéresse à la conservation ou non de l'énergie mécanique et plus généralement aux transferts d'énergie en mécanique. Il s'inscrit dans la suite des chapitres 5 à 7 qui traitent de la description des mouvements à travers une étude dynamique utilisant les lois de Newton. On peut faire remarquer à ce propos que pour de nombreux problèmes de mécanique, l'approche énergétique est souvent plus simple que celle utilisant les lois de Newton.

Le choix a été d'aborder ces notions à travers deux activités : l'une faisant découvrir la notion de travail d'une force constante et l'autre traitant le bilan d'énergie (un mouvement sans frottements et un autre avec frottements y sont exploités à l'aide d'une chronophotographie).

Conformément aux attentes du programme, plusieurs calculs de travaux de forces usuelles sont proposés dans le cours : travail du poids et de la force électrique (forces constantes donc conservatives) et travail d'une force de frottements d'intensité constante (force non conservative). Une analyse des transferts énergétiques au cours des mouvements est souvent abordée dans l'activité 2, le cours et les exercices.

Les prérequis sont les notions de champs et de forces, d'énergie mécanique et du principe de conservation de l'énergie mécanique présentées dans les chapitres 18 à 20 du livre de Première S. La maîtrise des lois de Newton est également demandée.

## Activités

### 1 Travail d'une force constante (p. 216)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

#### *Objectif*

L'objectif de cette activité est d'exploiter des résultats expérimentaux pour découvrir la notion de travail d'une force constante. Elle permet de faire comprendre à l'élève que pour soulever une masse d'une certaine hauteur, on peut diminuer la force nécessaire à cette opération en utilisant des palans mais que le travail de cette force sera toujours le même.

#### *Correspondance avec le programme*

Comprendre l'expression du travail d'une force constante.

#### *Corrigé*

**a.** Le mouvement du ressort est rectiligne et uniforme (il est soulevée rectilignement à vitesse constante). Donc, en utilisant la première loi de Newton, on peut dire que la somme des forces s'exerçant sur le ressort est égale à $\vec{0}$.

Ainsi $\vec{F}_{op\to ressort} + \vec{F}_{masse\to ressort} = \vec{0}$

avec $\vec{F}_{op\to ressort} = \vec{F}_1$ la force que l'opérateur exerce sur le ressort et $\vec{F}_{masse\to ressort}$ la force que la masse exerce sur le ressort.

D'après la troisième loi de Newton ;

$\vec{F}_{masse\to ressort} + \vec{F}_{ressort\to masse} = \vec{0}$.

Donc $\vec{F}_1 = -\vec{F}_{masse\to ressort} = \vec{F}_{ressort\to masse}$.

Or, le mouvement de la masse est également rectiligne et uniforme donc en appliquant la première loi de Newton, on obtient $\vec{F}_{Terre\to masse} + \vec{F}_{ressort\to masse} = \vec{0}$

avec $\vec{F}_{Terre\to masse} = \vec{P}$ la force que la Terre exerce sur la masse (le poids).

Donc : $\vec{F}_1 = \vec{F}_{ressort\to masse} = -\vec{F}_{Terre\to masse} = -\vec{P}$.

Pour finir : $\vec{F}_1 = -\vec{P}$ donc $F_1 = P = mg$.

**b.** Pour la montée verticale :

$W_1 = F_1 d_1 = 1{,}00 \times 0{,}300 = 0{,}300$ N.m $= 0{,}300$ J.

L'incertitude relative associée au travail est :

$$\frac{\Delta W_1}{W_1} = \frac{\Delta F_1}{F_1} + \frac{\Delta d_1}{d_1} = \frac{0{,}03}{1{,}00} + \frac{0{,}4}{30{,}0} = 0{,}043.$$

Donc l'incertitude absolue du travail vaut :

$\Delta W_1 = 0{,}043 \times W_1 = 0{,}013$ J.

Ainsi, pour la montée verticale, le travail, associé à son incertitude, est égal à $W_1 = 0{,}300 \pm 0{,}013$ J.

Avec l'utilisation d'un palan à 2 poulies, le travail vaut :

$W_2 = F_2 d_2 = 0{,}48 \times 0{,}583 = 0{,}280$ N.m $= 0{,}280$ J.

L'incertitude relative associée au travail est :

$$\frac{\Delta W_2}{W_2} = \frac{\Delta F_2}{F_2} + \frac{\Delta d_2}{d_2} = \frac{0{,}03}{0{,}48} + \frac{0{,}4}{58{,}3} = 0{,}069.$$

Donc l'incertitude absolue du travail vaut :

$\Delta W_2 = 0{,}069 \times W_2 = 0{,}019$ J.

Ainsi, avec un palan à 2 poulies, le travail, associé à son incertitude, est égal à $W_2 = 0{,}280 \pm 0{,}019$ J.

En utilisant un palan à 4 poulies, le travail vaut :

$W_3 = F_3 d_3 = 0{,}25 \times 1{,}165 = 0{,}291$ N.m $= 0{,}291$ J.

L'incertitude relative associée au travail est :

$$\frac{\Delta W_3}{W_3} = \frac{\Delta F_3}{F_3} + \frac{\Delta d_3}{d_3} = \frac{0{,}02}{0{,}25} + \frac{0{,}5}{116{,}5} = 0{,}084.$$

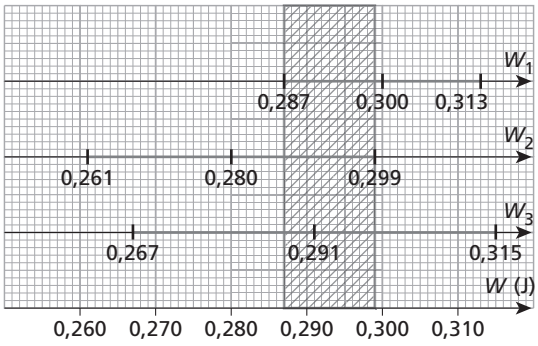
Donc l'incertitude absolue du travail vaut :

$\Delta W_3 = 0{,}084 \times W_3 = 0{,}024$ J.

Ainsi, avec un palan à 4 poulies, le travail, associé à son incertitude, est égal à $W_3 = 0{,}291 \pm 0{,}024$ J.

Comparons les intervalles de confiance de cette grandeur pour les trois expériences.

Les trois intervalles se recouvrent sur la zone hachurée du graphique (entre 0,287 J et 0,299 J).




Ainsi, la grandeur $W = Fd$ appelé *travail de la force*, est invariante pour les trois expériences.

**c.** Pour une montée de la masse d'une distance $d$ à partir de la position initiale, la variation de l'énergie potentielle de pesanteur est $\Delta E_{pp} = mgd$. Or, d'après la question **a.**, $mg = F$ donc $\Delta E_{pp} = Fd = W$. La variation d'énergie potentielle de pesanteur est égale au travail de la force $\vec{F}$ pour effectuer ce déplacement à vitesse constante.

**d.** En ajoutant des poulies, la force diminue. Il est ainsi plus aisé de soulever la masse. C'est l'intérêt du palan de réduire la force pour soulever une charge. *A contrario*, le travail n'est pas modifié.

L'opérateur doit toujours exercer le même travail pour soulever la masse d'une même hauteur. Ainsi, en ajoutant des palans, la force diminue mais la distance dont il faut tirer sur le dynamomètre de l'autre côté augmente.

### *Commentaires*

• Pour la question **a.** le résultat peut paraître évident *a priori* mais une démonstration rigoureuse est attendue ici.

• Pour la question **c.** on peut ici demander à l'élève à quel transfert d'énergie correspond alors ce travail. Il s'agit de convertir l'énergie fournie par l'opérateur (énergie biochimique) en énergie potentielle de pesanteur de la masse.

## 2 Bilan d'énergie (p. 217)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

### *Objectif*

L'objectif de cette activité est d'exploiter deux chronophotographies correspondant à deux mouvements distincts. Il s'agit de décrire qualitativement les transferts d'énergie au cours du mouvement. La première situation décrit le mouvement d'un pendule simple sans frottements. La deuxième situation représente le mouvement d'un savon sur un plan incliné subissant des frottements. L'utilisation du théorème de l'énergie mécanique permet de trouver la valeur $f$ de la force de frottements $\vec{f}$ dans ce cas.

### *Correspondance avec le programme*

Analyser les transferts énergétiques au cours d'un mouvement d'un point matériel.

### *Corrigé*

**a. Pour la situation 1 :**

Entre les points 1 et 8, l'énergie potentielle de pesanteur décroît et l'énergie cinétique augmente (la vitesse augmente car l'espace entre chaque point augmente au fur et à mesure). On a donc transfert d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique. Entre les points 9 et 16, c'est l'inverse : on a transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle de pesanteur. L'énergie mécanique du système se conserve car l'altitude atteinte par la masse au point 16 est la même que l'altitude initiale du point 1. Il n'y a donc pas de frottements dans ce cas.

**Pour la situation 2 :**

L'énergie potentielle de pesanteur décroît lors du mouvement et l'énergie cinétique augmente. C'est le travail du poids qui assure le transfert d'énergie

potentielle de pesanteur en énergie cinétique. Il n'est pas possible *a priori* de savoir si l'énergie mécanique se conserve ou non. La force de réaction normale, perpendiculaire au déplacement et orientée vers le haut, ne travaille pas et n'assure donc aucun transfert d'énergie.

**b. Pour la situation 1 :**

C'est le poids qui est responsable de ce transfert d'énergie. Entre les points 1 et 8, le travail du poids est positif : le poids est moteur. Entre les points 9 et 16, le travail est négatif : le poids est résistant. La tension de la corde, dirigée selon la corde et orientée vers le haut, est toujours perpendiculaire au déplacement. Cette force ne travaille pas lors du mouvement.

**Pour la situation 2 :**

C'est le poids, dont le travail est positif lors du mouvement, qui assure le transfert d'énergie potentielle de pesanteur en énergie cinétique. L'énergie mécanique ne se conserve pas, comme l'indique la question **d.** C'est la force de frottements qui assure un transfert d'énergie mécanique en chaleur par l'intermédiaire de son travail négatif lors du mouvement (la force de frottements est une force résistante, non conservative).

**c. Pour la situation 1 :**

L'énergie mécanique du pendule à la position 1 vaut :

$$E_m = E_c + E_{pp} = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgz_1$$

où $v_1 = 0$ et $z_1 = 0{,}29$ m sont respectivement la vitesse et l'altitude du pendule au point 1 (la référence d'énergie potentielle de pesanteur est choisie au niveau du point d'altitude minimale pour lequel $z = 0$).

Ainsi, l'énergie mécanique à la position 1 vaut : $E_m = 0{,}100 \times 9{,}8 \times 0{,}29 = 0{,}28$ J.

L'énergie mécanique du pendule à la position 8 vaut $E_m = E_c + E_{pp} = \frac{1}{2}mv_8^2 + mgz_8$ où $v_8$ est la valeur de la vitesse au point 8 et $z_8$ son altitude, nulle ici. La chronophotographie permet de calculer la vitesse $v_8$ (la distance entre les points 7 et 9 est divisée par deux fois la durée entre deux images successives). Elle vaut $v_8 = \frac{0{,}32}{2 \times 0{,}067} = 2{,}4$ m.s$^{-1}$.

L'énergie cinétique vaut alors :

$$E_c = \frac{1}{2}mv_8^2 = \frac{1}{2} \times 0{,}100 \times 2{,}4^2 = 0{,}29 \text{ J}.$$

Ainsi, l'énergie mécanique à la position 8 vaut $E_m = 0{,}29$ J.

Les deux valeurs sont les mêmes, aux erreurs de mesures près.

L'énergie mécanique est conservée lors du mouvement. Ceci est dû au fait que la seule force qui travaille lors du mouvement (le poids) est une force conservative. Les frottements sont ici négligeables au cours du mouvement.

**d. Pour la situation 2 :**

La force de frottements $\vec{f}$ s'oppose au mouvement. Elle est donc dirigée selon la pente, orientée vers le haut. Sa valeur $f$ est considérée comme constante lors du mouvement. En utilisant le théorème de l'énergie mécanique, la variation de l'énergie mécanique entre les positions 1 et $i$ quelconque s'écrit : $\Delta E_m = E_m(i) - E_m(1) = W_{1i}(\vec{F})$ où $W_{1i}(\vec{f})$ est le travail de la force de frottements $\vec{f}$ entre les positions 1 et $i$. $W_{1i}(\vec{f}) = -f \times L_i$ où $L_i$ est la distance séparant les positions 1 et $i$.

Donc $E_m(i) = E_m(1) + W_{1i}(\vec{f}) = E_m(1) - f \times L_i$.

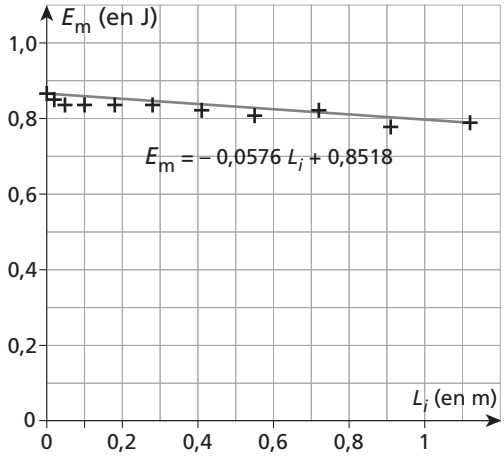
Le tracé de $E_m(i)$ en fonction de $L_i$ permet d'obtenir une droite dont le coefficient directeur est l'opposé de la valeur de $f$.

En chaque position $i$, l'expression de l'énergie mécanique est $E_m(i) = E_c(i) + E_{pp}(i) = \frac{1}{2}mv_i^2 + mgz_i$ avec $v_i$ et $z_i$ respectivement la vitesse et l'altitude du centre du savon à la position $i$ (la référence d'énergie potentielle de pesanteur est choisie au niveau du point d'altitude $z = 0$).

La vitesse $v_i$ se calcule à partir des deux points encadrant la position $i$. On a $v_i = \frac{L_{i+1} - L_{i-1}}{2\tau}$.

Le tableau suivant récapitule les valeurs de $z_i$, $L_i$, $v_i$, $E_c$, $E_{pp}$ et $E_m$ pour chaque position $i$.

| Position | $z_i$ (m) | $L_i$ (m) | $v_i$ (m.s$^{-1}$) | $E_c$ (J) | $E_{pp}$ (J) | $E_m$ (J) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,40 | 0 | 0 | 0,00 | 0,86 | 0,86 |
| 2 | 0,39 | 0,02 | 0,25 | 0,01 | 0,84 | 0,85 |
| 3 | 0,38 | 0,05 | 0,40 | 0,02 | 0,82 | 0,84 |
| 4 | 0,37 | 0,10 | 0,65 | 0,05 | 0,80 | 0,84 |
| 5 | 0,35 | 0,18 | 0,90 | 0,09 | 0,75 | 0,84 |
| 6 | 0,32 | 0,28 | 1,15 | 0,15 | 0,69 | 0,84 |
| 7 | 0,29 | 0,41 | 1,35 | 0,20 | 0,63 | 0,83 |
| 8 | 0,26 | 0,55 | 1,55 | 0,26 | 0,56 | 0,82 |
| 9 | 0,22 | 0,72 | 1,80 | 0,36 | 0,47 | 0,83 |
| 10 | 0,16 | 0,91 | 2,00 | 0,44 | 0,34 | 0,78 |
| 11 | 0,11 | 1,12 | 2,25 | 0,56 | 0,24 | 0,79 |
| 12 | 0,05 | 1,36 | | | 0,11 | |




La figure représente $E_m$ en fonction de $L_i$. Sur cette figure apparaît aussi l'équation modélisée par un logiciel de traitement de données.
L'équation modélisée de la droite est à mettre en relation avec l'expression établie $E_m(i) = E_m(1) - f \times L_i$. Par analogie, la valeur de la force de frottements est $f = 0{,}0576$ N soit $f = 58$ mN environ.

***Commentaires***

Pour la question **c.**, une erreur s'est glissée dans le spécimen enseignant où il est spécifié d'estimer la valeur de l'énergie mécanique au passage à la verticale. L'édition suivante, adressée aux élèves, stipule de la calculer à la position 8. C'est à ce dernier énoncé que s'adresse cette correction.

# Exercices

## Applications

### 1 Travail d'une force de traction

**a.** D'après le principe d'inertie, la tension $\vec{T}$ que la câble exerce sur la charge s'oppose au poids $\vec{P}$. Donc $T = P = mg = 2{,}0.10^3 \times 9{,}8 = 2{,}0.10^4$ N

**b.** Le travail de cette force sur le déplacement vertical vaut $W(\vec{T}) = T \times h = 2{,}0.10^4 \times 15 = 3{,}0.10^5$ J

**c.** Le travail de cette force assure la conversion d'énergie électrique (qui alimente la grue) en énergie potentielle de pesanteur.

### 2 Travail d'une force électrique

**a.** Le travail de la force électrique a pour expression $W_{AB}(\vec{F}) = qU_{AB}$.

**b.** Sa valeur est $W_{AB}(\vec{F}) = qU_{AB} = 1{,}60.10^{-19} \times 2{,}0.10^3$
$= 3{,}2.10^{-16}$ J $= 2{,}0$ keV

**c.** La force électrique est motrice car le travail est positif.

### 3 Vrai ou faux ? (1)

**a.** Faux : la dimension physique du travail est la même que celle d'une énergie.

**b.** Faux : toute force constante est conservative donc le travail d'une force constante sur un déplacement d'un point A vers un point B ne dépend pas du chemin suivi pour aller de A à B.

**c.** Faux : il existe des forces de frottements motrices. Par exemple, la force de frottements que la roue exerce sur la voiture pour l'accélérer, est une force motrice.

### 4 Les montagnes russes

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 636.*

### 5 Le skieur

**a.** Le travail du poids sur ce déplacement vaut :
$W(\vec{P}) = -mgh = -mgL\sin\alpha$
$= -60 \times 9{,}8 \times 50 \times \sin(15°) = -7{,}6.10^3$ J.
Le travail de la réaction du sol $\vec{R}$ est nul car $\vec{R}$ est perpendiculaire au déplacement : $W(\vec{R}) = 0$.
Le travail de la force de frottements $\vec{f}$ vaut :
$W(\vec{f}) = -fL = -10 \times 50 = -5{,}0.10^2$ J.

**b.** La réaction du sol $\vec{R}$ ne travaille pas, le poids $\vec{P}$ est une force motrice (travail positif) et la force de frottements $\vec{f}$ est une force résistante (travail négatif).

### 6 Objet sur un plan incliné

**a.** $W_{AB}(\vec{F_1}) = \vec{F_1} \cdot \overrightarrow{AB} = F_1 \times AB \times \cos(0°) = F_1 \times AB$
$= 100 \times 5{,}0 = 5{,}0.10^2$ J.
$W_{AB}(\vec{F_2}) = \vec{F_2} \cdot \overrightarrow{AB} = F_2 \times AB \times \cos(180° - 20°)$
$= 50 \times 5{,}0 \times \cos(160°) = -2{,}3.10^2$ J.
$W_{AB}(\vec{F_3}) = \vec{F_3} \cdot \overrightarrow{AB} = F_3 \times AB \times \cos(90° + 20°)$
$= 200 \times 5{,}0 \times \cos(110°) = -3{,}4.10^2$ J.
$W_{AB}(\vec{F_4}) = \vec{F_4} \cdot \overrightarrow{AB} = F_4 \times AB \times \cos(90°) = 0$ J.

**b.** La force $\vec{F_4}$ ne travaille pas, la force $\vec{F_1}$ est motrice (travail positif) et les forces $\vec{F_2}$ et $\vec{F_3}$ sont résistantes (travail négatif).

### 7 Vrai ou faux ? (2)

**a.** Vrai.

**b.** Faux : la force de traction d'une grue sur une charge montant à vitesse constante est une force constante mais elle n'est pas conservative.

**c.** Faux : dans le même exemple que précédemment, le travail de la force de traction est positif.

**d.** Faux : une force conservative est une force dont le travail ne dépend pas du chemin suivi.

### 8 Forces de frottements

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 636.*

### 9 Vrai ou faux ? (3)

**a.** Faux : le poids est une force conservative dont le travail peut être négatif : il suffit pour cela que le système monte.

**b.** Faux : c'est à une force conservative qu'on associe toujours une énergie potentielle.

**c.** Faux : une force de frottements, non conservative, peut varier en norme ou en direction. Dans ce cas, c'est une force non constante et non conservative.

**d.** Faux : une force de frottements, non conservative, travaille sur un trajet quelconque (puisqu'elle s'oppose toujours au mouvement et n'est donc jamais perpendiculaire au déplacement).

### 10 Chute libre

**a.** Le travail du poids sur ce trajet vaut :
$W(\vec{P}) = mgh = 70 \times 9{,}8 \times 10 = 6{,}9.10^3$ J.
La variation d'énergie potentielle de pesanteur associée au même trajet vaut $\Delta E_{pp} = -\,mgh = -\,6{,}9.10^3$ J.
C'est exactement l'opposé du travail du poids.

**b.** La variation d'énergie cinétique vaut :
$\Delta E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 70 \times 14^2 = 6{,}9.10^3$ J
(car $v = 50$ km.h$^{-1}$ $= 14$ m.s$^{-1}$).
La variation d'énergie mécanique est donc :
$\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c = -\,6{,}9.10^3 + 6{,}9.10^3 = 0$ J.
L'énergie mécanique se conserve donc lors de ce trajet. Donc l'homme n'est soumis qu'au poids, force conservative. Donc la force de frottements de l'air (non conservative) est négligée lors de cette chute.

### 11 Particule α dans un champ électrostatique uniforme

**a.** La force électrique que subit la particule α a pour expression vectorielle $\vec{F} = q\vec{E}$ où $\vec{E}$ est le champ électrostatique, orienté de A vers B car $U_{AB} > 0$. Une particule α possède une charge électrique positive donc la force électrique $\vec{F}$ est donc dirigée de A vers B. La particule α est donc attirée vers la plaque B.

**b.** Le travail de cette force entre A et B vaut :
$W_{AB}(\vec{F}) = q\,U_{AB} = 4e\,U_{AB} = 4 \times 1{,}6.10^{-19} \times 5{,}0.10^3$
$= 3{,}2.10^{-15}$ J.

**c.** La force électrique est une force conservative donc la variation de l'énergie potentielle électrique est égale à l'opposée du travail de la force entre A et B.
Elle vaut donc $\Delta E_{pé} = -\,3{,}2.10^{-15}$ J.

**d.** La particule α n'est soumise qu'à la force électrique, force conservative, donc son énergie mécanique se conserve entre A et B. Ainsi, la variation d'énergie mécanique entre A et B vaut :
$\Delta E_m = \Delta E_{pé} + \Delta E_c = 0$ donc $\Delta E_c = -\,\Delta E_{pé} = W_{AB}(\vec{F})$.
Et donc $\frac{1}{2}mv^2 = W_{AB}(\vec{F})$. Ainsi :

$$v = \sqrt{\frac{2W_{AB}(\vec{F})}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 3{,}2.10^{-15}}{4 \times 1{,}7.10^{-27}}} = 9{,}7.10^5 \text{ m.s}^{-1}.$$

### 12 The falling flower pot

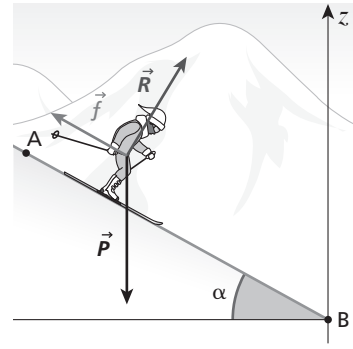
**a.** La seule force que subit le pot de fleurs est le poids donc l'énergie mécanique se conserve lors de la chute. L'énergie mécanique du pot de fleur vaut
$E_m = E_c + E_{pp} = mgz$ (car $E_c = 0$ initialement).
$E_m = 2{,}0 \times 9{,}8 \times 15 = 2{,}9.10^2$ J.

**b.** Au niveau du sol, la vitesse est telle que :
$\frac{1}{2}mv^2 = E_m$ ($z$ étant nulle au niveau du sol).
Donc $\frac{1}{2}mv^2 = mgz$.
Ainsi : $v = \sqrt{2gz} = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 15} = 17$ m.s$^{-1}$.
Cette vitesse est indépendante de la masse du pot de fleurs.

## Entraînement

### 13 Un skieur sur une piste inclinée

**a.** Les forces que subit le skieur sont représentées sur la figure suivante :




Il y a :
• le poids $\vec{P}$, vertical, vers le bas, de valeur :
$P = mg = 70 \times 9{,}8 = 6{,}9.10^2$ N,
• la réaction de la piste $\vec{R}$, perpendiculaire à la piste, vers le haut, de valeur inconnue $R$,
• la force de frottements $\vec{f}$, parallèle à la piste, opposé au mouvement et de valeur $f$.

Le poids $\vec{P}$ est une force motrice (car le skieur descend) et c'est une force conservative. La réaction $\vec{R}$ ne travaille pas (car elle est perpendiculaire à la piste). La force de frottements $\vec{f}$ est résistante car elle s'oppose au déplacement et elle n'est pas conservative.

**b.** La variation d'énergie mécanique entre les points A et B vaut :

$\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c = mg(z_B - z_A) + 0$
(la vitesse est constante).

**c.** Le théorème de l'énergie mécanique entre les points A et B s'écrit :

$\Delta E_m = W_{AB}(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB} = -f \times AB = -f \times \dfrac{z_A - z_B}{\sin\alpha}$
$= mg(z_B - z_A)$ d'après **b.** Donc $f = mg\sin\alpha$.

**d.** $f = 70 \times 9{,}8 \times \sin(20°) = 2{,}3.10^2$ N.

## 14 Travail d'une force

**a.** ① Je suis le meilleur : bulle D – force $\vec{F}_D$ motrice dans le même sens que le déplacement.

② Je ne sers à rien : bulle B – force $\vec{F}_B$ qui ne travaille pas car perpendiculaire au déplacement.

③ Je fais ce que je peux : bulle C – force $\vec{F}_C$ motrice.

④ Je résiste : bulle A – force $\vec{F}_A$ résistante car elle s'oppose au mouvement.

**b.** En projetant chaque force sur un axe horizontal, orienté dans le sens du mouvement, la coordonnée de la résultante des forces sur cet axe vaut :

$F_D + F_C\cos\alpha - F_A\cos\alpha = 400 + (100 - 500) \times \cos(45°)$
$= 1{,}2.10^2$ N $> 0$

donc le wagon se mettra à bouger vers la droite, sens du déplacement.

**c.** Le travail de la force résultante sur un mètre de déplacement du wagon vaut :

$W = 1{,}2.10^2 \times 1 = 1{,}2.10^2$ J.

**d.** Ce travail ne sert qu'à augmenter l'énergie cinétique du wagon donc sa vitesse.

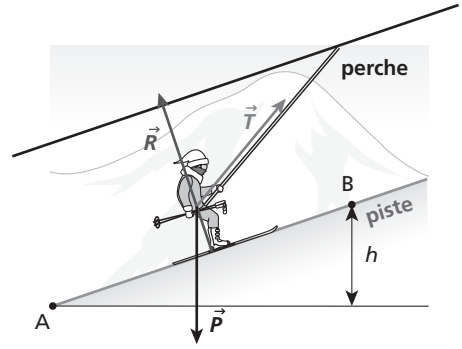
Donc $W = \dfrac{1}{2}mv^2$ soit :

$v = \sqrt{\dfrac{2W}{m}} = \sqrt{\dfrac{2 \times 1{,}2.10^2}{100}} = 1{,}5$ m.s$^{-1}$.

## 15 Force de rappel de la perche d'un téléski

**a.** Les forces exercées sur le skieur sont représentées sur la figure ci-après. Il y a :

- le poids $\vec{P}$, vertical, vers le bas,
- la réaction de la piste $\vec{R}$, perpendiculaire à la piste, vers le haut,
- la force de rappel de la perche $\vec{T}$, dans l'axe de la perche, orientée vers le haut.




**b.** Le travail du poids entre A et B est $W_{AB}(\vec{P}) = -mgh$.

**c.** La variation d'énergie mécanique du skieur entre A et B vaut :

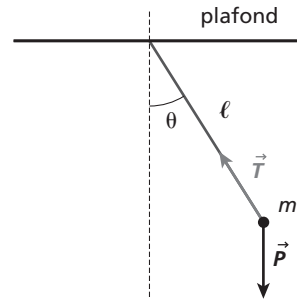
$\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c = mg(z_B - z_A) + 0$ (vitesse constante) soit $\Delta E_m = mgh > 0$.

L'énergie mécanique croît au cours du mouvement : elle n'est pas conservée.

**d.** La variation d'énergie mécanique est égale au travail de la force de rappel de la perche, seule force non conservative. Donc $W_{AB}(\vec{P}) = \Delta E_m = mgh$.

## 16 Le pendule simple

**a.** Les forces exercées sur la masse sont représentées sur la figure ci-contre :




Il y a :

- le poids $\vec{P}$, vertical, vers le bas, de valeur $P = mg$.
- la tension du fil $\vec{T}$, selon la direction du fil, vers le haut, de valeur $T$.

**b.** La tension du fil $\vec{T}$ ne travaille pas sur le déplacement car elle est, à chaque instant, perpendiculaire à celui-ci. Seul le poids, force conservative, travaille. Donc l'énergie mécanique est conservée lors du mouvement. En appliquant le théorème de l'énergie mécanique entre A et B, il vient $\Delta E_m = 0$,

soit $\dfrac{1}{2}mv_B^2 - \dfrac{1}{2}mv_A^2 + mg(z_B - z_A) = 0$

donc $\dfrac{1}{2}mv_B^2 - mg(\ell - \ell\cos\theta) = 0$.

Donc $\dfrac{1}{2}mv_B^2 = mg\ell(1 - \cos\theta)$ soit

$v_B = \sqrt{2g\ell(1 - \cos\theta)} = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 0{,}50 \times (1 - \cos 20°)}$
$= 0{,}77$ m.s$^{-1}$.

L'énergie mécanique se conservant et les points A et C ayant la même altitude, la vitesse en C est donc nulle.

**c.** Le pendule doit toucher le plafond en D, sans vitesse. En appliquant le théorème de l'énergie mécanique entre A et D, il vient $\Delta E_m = 0$,

soit $\frac{1}{2}mv_D^2 - \frac{1}{2}mv_A^2 + mg(z_D - z_A) = 0$ donc

$-\frac{1}{2}mv^2 + mg\ell\cos q = 0$ car $v_D = 0$ et $z_D - z_A = \ell\cos\theta$.

Ainsi, $\frac{1}{2}mv^2 = mg\ell\cos\theta$ soit $v = \sqrt{2g\ell\cos\theta}$

$= \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 0{,}50 \times \cos 20^\circ} = 3{,}0$ m.s$^{-1}$.

### 17 Saut de ski nautique

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 636.*

### 18 Lob au tennis

**a.** L'énergie mécanique initiale vaut $E_m = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgh$ en prenant la référence d'énergie potentielle de pesanteur au niveau du sol.

$E_m = \frac{1}{2}0{,}055 \times 12^2 + 0{,}055 \times 9{,}8 \times 1{,}0 = 4{,}5$ J.

Elle est constante au cours du mouvement car la balle n'est soumise qu'à son poids, force conservative.

**b.** En appliquant le théorème de l'énergie mécanique entre le point de départ et le sommet S de la trajectoire, il vient $\frac{1}{2}mv_S^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + mg(z_S - h) = 0$

avec $v_S = v_0\cos\alpha$ (en S, la composante verticale de la vitesse est nulle).

Donc $2g(z_S - h) = v_0^2 - v_S^2 = v_0^2(1 - \cos^2\alpha)$

soit $z_S = h + \frac{v_0^2(1 - \cos^2\alpha)}{2g}$.

Donc $z_S = 1{,}0 + \frac{12^2 \times (1 - (\cos 45^\circ)^2)}{2 \times 9{,}8} = 4{,}7$ m.

**c.** La balle touche le sol en B. En appliquant le théorème de l'énergie mécanique entre le point de départ et B, il vient $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + mg(0 - h) = 0$

soit $v^2 = v_0^2 + 2gh$ où $v = \sqrt{v_0^2 + 2gh}$.

Donc $v = \sqrt{12^2 + 2 \times 9{,}8 \times 1{,}0} = 13$ m.s$^{-1}$.

**d.** La force de frottements $\vec{f}$ de l'air sur la balle est responsable de cette différence. Le théorème de l'énergie cinétique entre le point de départ et B s'écrit dans ce cas :

$\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c = W_{AB}(\vec{f})$

soit $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + mg(0 - h) = W_{AB}(\vec{f})$.

Ainsi, $W_{AB}(\vec{f}) = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 - mgh =$

$\frac{1}{2} \times 0{,}055 \times 10^2 - \frac{1}{2} \times 0{,}055 \times 12^2 - 0{,}055 \times 9{,}8 \times 1{,}0$

$= -1{,}7$ J.

Ce travail est négatif car la force de frottements est résistante.

### 19 Bille sur un circuit

**a.** La vitesse initiale est nulle donc la courbe rose est celle de l'énergie cinétique. La courbe verte est l'énergie potentielle de pesanteur car la bille chute au début du parcours. La courbe violette est celle de l'énergie mécanique qui est la somme des deux autres.

**b.** Sur l'acier, l'énergie mécanique est conservée donc les frottements sont négligés sur cette portion. Sur le bois et le sable, l'énergie mécanique décroît. Cette diminution est liée au travail de la force de frottements sur chaque matériau. Elle décroît davantage sur le sable que sur le bois. Donc les frottements sont plus grands sur le sable que sur le bois.

**c.** L'énergie potentielle de pesanteur initiale est $E_p = mgh$ et vaut 0,060 J où $h$ est l'altitude de la bille. Donc $h = \frac{E_p}{mg}$ soit $h = \frac{0{,}060}{25.10^{-3} \times 9{,}8} = 0{,}24$ m.

**d.** L'énergie cinétique maximale est $E_c = \frac{1}{2}mv_{max}^2$ et vaut 0,060 J où $v_{max}$ est la vitesse maximale atteinte par la bille.

Donc $v_{max} = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 0{,}060}{0{,}025}} = 2{,}2$ m.s$^{-1}$.

**e.** À la fin du trajet, la bille possède une altitude et une vitesse nulles. Elle est située à l'abscisse $x = 60$ cm du point de départ.

## Approfondissement

### 20 Looping sur un circuit

**a.** Le poids est une force résistante quand la voiture monte (portion de B à E) et est une force motrice quand la voiture descend (portions de A à B et de E à F).

**b.** La voiture n'étant soumise qu'à une force conservative (le poids) et une autre qui ne travaille pas (la réaction du rail, perpendiculaire au mouvement), l'énergie mécanique est constante au cours du mouvement.

Ainsi, $E_m(A) = E_m(B)$

donc $\frac{1}{2}mv_A^2 + mgz_A = \frac{1}{2}mv_B^2 + mgz_B$

où $v_A = 0$ et $z_B = 0$.

Donc $mgz_A = \frac{1}{2}mv_B^2$

soit $v_B = \sqrt{2gz_A} = \sqrt{2 \times 9{,}8 \times 0{,}50} = 3{,}1$ m.s$^{-1}$.

**c.** $E_m(A) = E_m(M)$ car $E_m$ se conserve donc

$\frac{1}{2}mv_A^2 + mgz_A = \frac{1}{2}mv_\theta^2 + mgz_M$

avec $z_M = R(1 - \cos\theta)$.

Donc $mgz_A = \frac{1}{2}mv_\theta^2 + mgR(1-\cos\theta)$

soit $v_\theta = \sqrt{2gz_A - 2gR(1-\cos\theta)}$.

**d.** Au point C : $\theta = \frac{\pi}{2}$

donc : $v_C = \sqrt{2gz_A - 2gR} = \sqrt{2g(z_A - R)}$

$= \sqrt{2\times 9{,}8\times(0{,}50-0{,}15)} = 2{,}6$ m.s$^{-1}$.

Au point D : $\theta = \frac{3\pi}{4}$ donc $v_D = \sqrt{2gz_A - 2gR\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right)}$

$= \sqrt{2\times 9{,}8\times 0{,}50 - 2\times 9{,}8\times 0{,}15\times\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}\right)}$

$= 2{,}2$ m.s$^{-1}$.

Au point E : $\theta = \pi$ donc :

$v_E = \sqrt{2gz_A - 4gR} = \sqrt{2g(z_A - 2R)}$

$= \sqrt{2\times 9{,}8\times(0{,}50-2\times 0{,}15)} = 2{,}0$ m.s$^{-1}$.

Au point F : $\theta = \frac{3\pi}{2}$

donc $v_F = \sqrt{2gz_A - 2gR} = \sqrt{2g(z_A - R)}$

$= \sqrt{2\times 9{,}8\times(0{,}50-0{,}15)} = 2{,}6$ m.s$^{-1}$.

## 21 Électron entre deux plaques chargées

**a.** Le travail entre A et B est $W_{AB}(\vec{F}) = qU_{AB} = -eU_{AB}$ car $q = -e$ pour un électron.

**b.** Le travail ne sert qu'à augmenter l'énergie cinétique de l'électron donc :

$\frac{1}{2}mv^2 = -eU_{AB}$ donc $v = \sqrt{\frac{-2eU_{AB}}{m}}$.

**c.** La vitesse au carré s'exprime par $v^2 = \frac{-2eU_{AB}}{m}$

donc le graphique représentant $v^2$ en fonction de $|U_{AB}|$ est une droite passant par l'origine, de coefficient directeur $\frac{2e}{m}$. Graphiquement, ce coefficient vaut $\frac{1{,}8.10^{15}-0}{5{,}0.10^3-0} = 3{,}6.10^{11}$ unités SI.

donc $\frac{2e}{m} = 3{,}6.10^{11}$ unités SI.

Ainsi $m = \frac{2e}{3{,}6.10^{11}} = \frac{2\times 1{,}6.10^{-19}}{3{,}6.10^{11}} = 8{,}9.10^{-31}$ kg.

La valeur trouvée est proche de la valeur tabulée qui vaut $9{,}1.10^{-31}$ kg.

## 22 Théorèmes de l'énergie cinétique et de l'énergie mécanique

**a.** La deuxième loi de Newton s'écrit :

$\sum\vec{F} = m\vec{a}$ où $\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$ est le vecteur accélération du centre d'inertie du système.

En multipliant par le déplacement $\overrightarrow{d\ell} = \vec{v}dt$, il vient,

$\sum\vec{F}\cdot\vec{v}dt = m\frac{d\vec{v}}{dt}\cdot\vec{v}\,dt = m\vec{v}\cdot d\vec{v} = d\left(\frac{1}{2}mv^2\right) = dE_c$

soit $\sum\vec{F}\cdot\vec{v} = \frac{dE_c}{dt}$ d'où $\frac{dE_c}{dt} = \sum\mathcal{P}$.

Le théorème de l'énergie cinétique est retrouvé.

**b.** Le travail élémentaire vaut $\delta W = \vec{F}\cdot\overrightarrow{d\ell} = \vec{F}\cdot\vec{v}dt$ soit, en considérant toutes les forces conservatives, $\sum\frac{\delta W}{dt} = \sum\vec{F}.\vec{v} = \sum\mathcal{P} = \frac{dE_c}{dt}$. Le travail élémentaire s'écrit aussi $\delta W = -dE_p$ donc en considérant toutes les forces conservatives, $\sum\frac{\delta W}{dt} = -\frac{dE_p}{dt}$.

Ainsi, $\frac{dE_c}{dt} = -\frac{dE_p}{dt}$ soit $\frac{d(E_c+E_p)}{dt} = 0$ ou $\frac{dE_m}{dt} = 0$.

L'énergie mécanique est donc conservée lors du mouvement car le système n'est soumis qu'à un ensemble de forces conservatives.

## 23 Jeu de fête foraine

**a.** Trois forces s'exercent sur le sabot :

- le poids $\vec{P}$, vertical, vers le bas, de valeur $P = mg = 5{,}0\times 9{,}8 = 49$ N,
- la réaction du rail $\vec{R}$, perpendiculaire au rail, vers le haut,
- la force de frottements $\vec{f}$, opposée au mouvement et de valeur $f = 5{,}0$ N.

**b.** Le théorème de l'énergie mécanique entre les points A et M s'écrit :

$\Delta E_m = \Delta E_{pp} + \Delta E_c = W_{AM}(\vec{f})$ soit :

$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + mg(z_M - z_A) = W_{AM}(\vec{f}) = -fR\theta$

avec $z_M - z_A = R(1-\cos\theta)$.

Donc $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 + mgR(1-\cos\theta) = -fR\theta$.

Donc $v^2 = v_0^2 - \frac{2fR\theta}{m} - 2gR(1-\cos\theta)$ soit :

$v = \sqrt{v_0^2 - \frac{2fR\theta}{m} - 2gR(1-\cos\theta)}$.

**c.** Pour gagner le jeu, l'angle $\theta$ doit être égal à $\frac{\pi}{2}$ et $v$ doit être nulle dans le pire des cas.

Donc la relation précédente s'écrit :

$0 = v_0^2 - \frac{fR\pi}{m} - 2gR$ soit $v_0^2 = \frac{fR\pi}{m} + 2gR$.

Donc :

$v_0 = \sqrt{\frac{fR\pi}{m} + 2gR} = \sqrt{\frac{5{,}0\times 5{,}0\times\pi}{5{,}0} + 2\times 9{,}8\times 5{,}0}$

$= 11$ m.s$^{-1}$.

### 24 Énergie potentielle élastique

**a.** La courbe rose représente l'énergie potentielle de pesanteur $E_{pp}$ car celle-ci décroît au cours du mouvement (elle est maximale au début). La courbe bleue représente l'énergie cinétique $E_c$ car elle augmente au cours de la phase AC (la vitesse du système augmente). La courbe rouge représente l'énergie mécanique $E_m$ : elle est la somme des deux premières sur la phase AD. L'énergie mécanique est constante au cours du mouvement donc les forces de frottements sont nulles (elles sont en fait négligées).

**b.** Au point A, $E_{pp}(A) = 1{,}0$ J $= mgz_A$ soit :

$$z_A = \frac{E_{pp}(A)}{mg} = \frac{1{,}0}{0{,}1 \times 10} = 1{,}0 \text{ m}.$$

Au point B, $E_{pp}(B) = 0{,}10$ J $= mgz_B$ soit :

$$z_B = \frac{E_{pp}(B)}{mg} = \frac{0{,}10}{0{,}1 \times 10} = 0{,}10 \text{ m}.$$

L'échelle verticale est donc : 5 mm sur le graphique représente 0,20 m en réalité.

**c.** L'énergie cinétique maximale est lue graphiquement et vaut $E_{cmax} = 1{,}0$ J. Or $E_{cmax} = \frac{1}{2}mv_{max}^2$ donc $v_{max} = \sqrt{\frac{2E_{cmax}}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1{,}0}{0{,}100}} = 4{,}5 \text{ m.s}^{-1}$.

Le solide possède cette vitesse sur la portion CD.

**d.** Sur la portion DE, l'énergie cinétique décroît fortement pour s'annuler en E, l'énergie potentielle de pesanteur est nulle et l'énergie mécanique est constante. Donc il existe une énergie potentielle élastique $E_{pe}$, liée au ressort, telle que l'énergie mécanique soit conservée sur la portion DE.

**e.** En effectuant une analyse dimensionnelle, $[k] = \frac{[E]}{[x^2]} = \frac{[F][x]}{[x]^2} = \frac{[F]}{L}$ donc l'unité de la constante $k$ est le newton par mètre : $\text{N.m}^{-1}$.

**f.** Au point E, l'énergie mécanique est intégralement de l'énergie potentielle élastique donc :

$$E_m(E) = \frac{1}{2}k(x_E - x_D)^2 = 1{,}0 \text{ J}.$$

Ainsi, $k = \frac{2E_m(E)}{(x_E - x_D)^2} = \frac{2 \times 1{,}0}{(4{,}25 - 3{,}5)^2} = 3{,}6 \text{ N.m}^{-1}$.

## Exercices de BAC

### 25 Gare de triage de wagons

**1.a.** La valeur de la force de frottements vaut $f = mr$. Pour le wagon considéré, $r = 0{,}32$ unités S.I. et la masse du wagon est constante donc $f$ est constante au cours du mouvement.

D'après une analyse dimensionnelle, $[r] = \frac{[f]}{[m]}$.

Or, d'après la deuxième loi de Newton, $[f] = [m][a]$ donc $[r] = \frac{[m][a]}{[m]} = [a]$. Ainsi, le coefficient $r$ a bien la dimension d'une accélération.

**b.** Trois forces s'exercent sur le wagon lors de son mouvement sur le trajet AD :

- le poids $\vec{P}$, vertical et vers le bas, de valeur $mg$,
- la réaction normale à la piste $\vec{R}_n$, perpendiculaire à la piste, orientée vers le haut,
- la force de frottements $\vec{f}$, de direction celle du mouvement et de sens opposé, de valeur $f = mr$.

Sur le trajet A $\rightarrow$ B :

$W_{AB}(\vec{P}) = mgh$, $W_{AB}(\vec{R}_n) = 0$ et $W_{AB}(\vec{f}) = -f \times AB$.

Sur le trajet B $\rightarrow$ D :

$W_{BD}(\vec{P}) = 0$, $W_{BD}(\vec{R}_n) = 0$ et $W_{BD}(\vec{f}) = -f \times BD$.

Donc sur l'ensemble du trajet A $\rightarrow$ D :

$W_{AD}(\vec{P}) = W_{AB}(\vec{P}) + W_{BD}(\vec{P}) = mgh$,

$W_{AD}(\vec{R}_n) = W_{AB}(\vec{R}_n) + W_{BD}(\vec{R}_n) = 0$ et

$W_{AD}(\vec{f}) = W_{AB}(\vec{f}) + W_{BD}(\vec{f}) = -f(AB + BD) = -fL$.

**c.** Seul le poids est une force conservative (la force de frottements de l'est pas et le travail de la réaction normale est toujours nul).

**d.** L'énergie mécanique décroît au cours du mouvement. Sa variation entre les points A et D est égale au travail de la force de frottements entre A et D : $\Delta E_m = W_{AD}(\vec{f}) = -fL$.

Or $\Delta E_m = E_m(D) - E_m(A)$.

$E_m(D) = \frac{1}{2}mv_D^2 + mgz_D = 0$ avec $v_D = 0$ et $z_D = 0$ (altitude du point D).

$E_m(A) = \frac{1}{2}mv_A^2 + mgz_A = \frac{1}{2}mv_A^2 + mgh$ car $z_A = h$ (altitude du point A).

Donc $\Delta E_m = 0 - \left(\frac{1}{2}mv_A^2 + mgh\right) = -fL$.

Ainsi, $\frac{1}{2}mv_A^2 + mgh = fL$

et $v_A^2 = \frac{2(fL - mgh)}{m} = 2\left(\frac{f}{m}L - gh\right)$

soit $v_A^2 = 2(rL - gh)$.

**e.** $v_A = \sqrt{2(rL - gh)} = \sqrt{2(0{,}32 \times 80 - 9{,}8 \times 1{,}0)}$ $= 5{,}6 \text{ m.s}^{-1}$.

**2.a.** La variation entre les points C et E est égale au travail de la force de frottements entre C et E : $\Delta E_m = W_{CE}(\vec{f}) = -f \times CE = -fL'$.

Or $\Delta E_m = E_m(E) - E_m(C)$.

$E_m(E) = \frac{1}{2}mv_E^2 + mgz_E = \frac{1}{2}mv_E^2$

et $E_m(C) = \frac{1}{2}mv_C^2 + mgz_C = \frac{1}{2}mv_C^2$.

Donc $\frac{1}{2}mv_E^2 - \frac{1}{2}mv_C^2 = -fL'$ soit $\frac{1}{2}mv_C^2 = \frac{1}{2}mv_E^2 + fL'$

donc $v_C^2 = v_E^2 + \frac{2fL'}{m}$ soit $v_C^2 = v_E^2 + 2rL'$.

**b.** Pour $v_E = 0{,}50$ m.s$^{-1}$ :

$v_C = \sqrt{v_E^2 + 2rL'} = \sqrt{0{,}50^2 + 2 \times 0{,}32 \times 40}$

$= 5{,}1$ m.s$^{-1}$.

Pour $v_E = 1{,}5$ m.s$^{-1}$ :

$v_C = \sqrt{1{,}5^2 + 2 \times 0{,}32 \times 40} = 5{,}3$ m.s$^{-1}$.

La vitesse $v_C$ doit donc être comprise entre 5,1 m.s$^{-1}$ et 5,3 m.s$^{-1}$.

## 26 Étude énergétique d'un mobile autoporteur

**1.a.** Le mouvement a lieu sur l'axe $(Ox)$ donc la vitesse instantanée à la date $t = 20$ ms se calcule par $v = \frac{1{,}0.10^{-3} - 0{,}12.10^{-3}}{30.10^{-3} - 10.10^{-3}}$

$= 4{,}4.10^{-2}$ m.s$^{-1}$ $= 44$ mm.s$^{-1}$.

L'énergie cinétique vaut :

$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 0{,}22 \times (4{,}4.10^{-2})^2$

$= 2{,}1.10^{-4}$ J $= 0{,}21$ mJ.

L'énergie potentielle de pesanteur vaut :

$E_{pp} = mgz = 0{,}22 \times 9{,}8 \times 7{,}5.10^{-3} = 1{,}6.10^{-2}$ J

$= 16$ mJ.

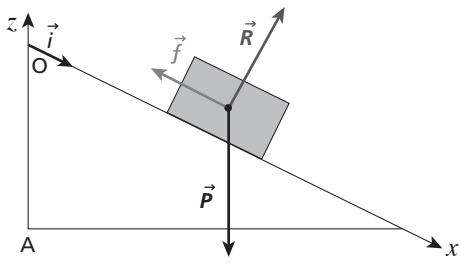
L'énergie mécanique vaut alors :

$E_m = E_c + E_{pp} = 16{,}2$ mJ.

**b.** Trois forces s'exercent sur le mobile en mouvement :

- le poids $\vec{P}$, vertical, orienté vers le bas,
- la réaction normale du plan $\vec{R}$, perpendiculaire au plan, orientée vers le haut,
- la force de frottements $\vec{f}$, opposée au mouvement.

La figure suivante représente ces forces sans souci d'échelle.




**c.** Le théorème de l'énergie mécanique appliqué au mobile entre les points O et G d'abscisse $x$ s'écrit :

$\Delta E_m = W_{OG}(\vec{f})$ soit $E_m(x) - E_m(0) = -fx$.

Donc $E_m(x) = E_m(0) - fx$.

**2.a.** La courbe obtenue est une droite. Son coefficient directeur s'obtient en choisissant deux points de la droite (les abscisses s'exprimant en mètres et les ordonnées en joules), par exemple (0 ; 0,016 5) et (0,026 ; 0015 1).

Il vaut $\frac{0{,}015\,1 - 0{,}016\,5}{0{,}026 - 0} = -5{,}4.10^{-2}$ J.m$^{-1}$.

Son ordonnée à l'origine est 0,0165 J.

Ainsi, l'équation de la droite est :

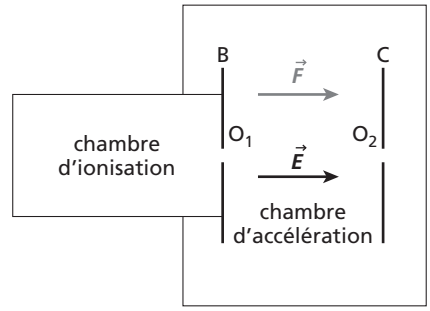
$E_m(x) = 0{,}016\,5 - 5{,}4.10^{-2}x$.

**b.** En utilisant la réponse de la question **2.a.** et par analogie avec l'expression trouvée en **1.c**, il vient $f = 5{,}4.10^{-2}$ N soit $f = 54$ mN.

## 27 Détermination d'un nombre de masse *A*

**a.** Les ions sont accélérés du point $O_1$ au point $O_2$. Ainsi, la force $\vec{F}$ que subit l'ion $^{68}Zn^{2+}$ est perpendiculaire aux plaques et orientée de $O_1$ vers $O_2$. On a $\vec{F} = 2e\vec{E}$ car la charge de cet ion est $2e$. Donc le champ électrostatique $\vec{E}$ est orienté de la plaque B vers la plaque C, perpendiculaire aux plaques.

La figure suivante représente ces deux vecteurs, sans souci d'échelle.




**b.** Le champ électrostatique $\vec{E}$ est orienté selon les potentiels électriques décroissants donc $U_{BC}$ est une tension positive.

**c.** Pour chacun des ions $^{68}Zn^{2+}$ et $^{A}Zn^{2+}$, le travail de la force électrique entre les points $O_1$ et $O_2$ s'écrit :

$W_{O_1O_2}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \overrightarrow{O_1O_2} = 2e\vec{E} \cdot \overrightarrow{O_1O_2} = 2e\frac{U_{BC}}{O_1O_2}O_1O_2$

$= 2eU_{BC}$

Soit :

$W_{O_1O_2}(\vec{F}) = 2 \times 1{,}60.10^{-19} \times 5{,}00.10^3 = 1{,}60.10^{-15}$ J

$= \frac{1{,}60.10^{-15}}{1{,}60.10^{-19}}$eV $= 10{,}0$ keV.

Ce travail correspond à un transfert d'énergie potentielle électrique en énergie cinétique de l'ion.

**d.** En utilisant le résultat de la question c, on en déduit que le travail de la force $\vec{F}$ entre les points $O_1$ et $O_2$ est égale à l'énergie cinétique acquise par l'ion au point $O_2$.

Ainsi, pour l'ion $^{68}Zn^{2+}$, $W_{O_1O_2}(\vec{F}) = \frac{1}{2}m_{68}v_{68}^2$ soit

$$v_{68} = \sqrt{\frac{2W_{O_1O_2}(\vec{F})}{m_{68}}} = \sqrt{\frac{4eU_{BC}}{m_{68}}}.$$

Sa valeur est :

$$v_{68} = \sqrt{\frac{4 \times 1{,}60.10^{-19} \times 5{,}00.10^{3}}{68 \times 1{,}67.10^{-27}}} = 1{,}68.10^{5}\ \text{m.s}^{-1}.$$

**e.** D'après l'expression précédente, si la tension $U_{BC}$ était doublée, $v_{68}$ serait multipliée par $\sqrt{2}$.

**f.** Pour l'ion $^{A}Zn^{2+}$, $W_{O_1O_2}(\vec{F}) = \frac{1}{2}m_Av_A^2$ soit :

$$v_A = \sqrt{\frac{2W_{O_1O_2}(\vec{F})}{m_A}} = \sqrt{\frac{m_{68}v_{68}^2}{m_A}} = \sqrt{\frac{68m_nv_{68}^2}{Am_n}} = \sqrt{\frac{68}{A}}v_{68}.$$

**g.** Ainsi, $\frac{v_A}{v_{68}} = \sqrt{\frac{68}{A}} = 1{,}03$.

Donc $A = \frac{68}{1{,}03^2} = 64$.

L'isotope inconnu est caractérisé par un nombre de masse $A = 64$.

## Rédiger une synthèse de documents

### 28 Retour sur Terre

*Analyse de la question*

La question demande de montrer que l'énergie mécanique de la navette a diminué lors de son atterrissage. Afin de quantifier l'énergie dissipée, il faut d'une part utiliser l'expression connue de l'énergie cinétique et celle de l'énergie potentielle gravitationnelle donnée dans l'énoncé et d'autre part exploiter les données numériques du document 2. Il conviendra d'analyser les transferts énergétiques et d'appliquer le théorème de l'énergie mécanique au cas d'une force de frottements non conservative.

*Piste de réponses et mots-clés*

L'**énergie mécanique** $E_m$ de la navette est la somme de son **énergie cinétique** $E_c$ et de **l'énergie potentielle gravitationnelle** $E_p$ (la valeur de la pesanteur n'étant pas la même au niveau du sol et à l'altitude considérée de l'orbite, il serait erroné d'utiliser la formule de l'énergie potentielle de pesanteur).

Lors du retour sur Terre, il y a une **variation** importante de l'**énergie mécanique** $E_m$.

Entre sa position B au repos sur Terre (dans le référentiel terrestre) une fois atterrie et sa position initiale A en orbite, cette **variation** s'écrit :

$$\Delta E_m = E_m(B) - E_m(A)$$

$$= \frac{1}{2}mv_B^2 - G\frac{mM_T}{r_B} - \frac{1}{2}mv_A^2 + G\frac{mM_T}{r_A}$$ et se calcule en utilisant les **valeurs numériques** trouvées dans l'exercice et dans le document 2 (à exprimer en **unités S.I.**). Elle vaut :

$$- 6{,}67.10^{-11} \times \frac{60.10^3 \times 5{,}97.10^{24}}{6{,}4.10^6}$$

$$- \frac{1}{2} \times 60.10^3 \times (6{,}9.10^3)^2$$

$$+ 6{,}67.10^{-11} \times \frac{60.10^3 \times 5{,}97.10^{24}}{6{,}4.10^6 + 400.10^3}$$

$$= - 1{,}6.10^{12}\ \text{J}$$

car $v_B = 0$, $v_A = 25.10^3\ \text{km.h}^{-1} = 6{,}9.10^3\ \text{m.s}^{-1}$, $r_B = R_T = 6{,}4.10^6$ m et $r_A = 6{,}4.10^6 + 400.10^3$ m.

Cette valeur, négative, montre qu'il y a eu **perte d'énergie mécanique** lors du retour sur Terre.

Le **théorème de l'énergie mécanique** nous renseigne sur l'origine de cette perte : elle est liée aux **travaux** des **forces non conservatives** lors de l'atterrissage. La seule **force non conservative** est la **force de frottements** due à l'atmosphère. Cette **perte d'énergie** est donc égale au **travail de la force de frottements** avec l'atmosphère. Cette **énergie** est **dissipée** dans la navette par **transfert thermique**, ce qui augmente fortement la température de la celle-ci. Les points en contact direct avec l'atmosphère lors du retour sur Terre (avant du fuselage, avant des ailes…) sont davantage chauffés que les autres. Cette **augmentation de température** nécessite la pose de tuiles thermiquement isolantes afin d'éviter la fonte de la navette aux points sensibles.

Chapitre 9

# Oscillateurs et mesure du temps

## Introduction au chapitre (p. 238)

Ce chapitre est conçu selon deux axes. Premièrement, il vient après le chapitre 8 définissant les différentes notions énergétiques au programme, dans la continuité de l'enseignement de Première S. Et, deuxièmement, il traite toutes les compétences exigibles du programme relatives au temps. Il se positionne donc, en quelque sorte, comme une conclusion au cheminement des chapitres 5, 6, 7, 8, où le temps apparaît non comme objet d'étude mais comme variable pour les grandeurs mécaniques. Il constitue également un préalable au chapitre 10, où le temps est traité selon un aspect nouveau, celui de la relativité restreinte. C'est donc un chapitre charnière entre physique classique et physique moderne. Son contenu le montre bien : il y est question à la fois des définitions anciennes du temps, issues des observations astronomiques qui ont fait la gloire de la physique classique, et de la définition moderne (voire des définitions futures), rendue possible par les progrès théoriques et pratiques du XX$^{e}$ siècle.

Il débute par une grosse activité documentaire, relative aux compétences « Extraire et exploiter des informations », ainsi que deux activités expérimentales conformes au programme. Le cours est construit autour du pendule simple et du pendule élastique, d'une part du point de vue de l'abstraction théorique, d'autre part en lien avec les systèmes de mesure du temps. Le cours est clos par la définition actuelle de la seconde, et pourra sur ce sujet être complété par l'exercice résolu B p. 251 et le document 1 p. 257 du manuel de l'élève.

## Activités

### 1 Précision de la mesure du temps (p. 240)

Histoire des Sciences

#### *Objectif*

Cette activité répond aux trois compétences exigibles du programme concernant la mesure du temps. Il s'agit d'extraire et exploiter des informations, voilà pourquoi des documents variés sont proposés : à l'élève de déterminer ce qui relève de l'illustration ou de l'argumentation, pour les différentes questions posées.

#### *Correspondance avec le programme*

• Extraire et exploiter des informations relatives à la mesure du temps pour justifier l'évolution de la définition de la seconde.

• Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde.

• Extraire et exploiter des informations pour justifier l'utilisation des horloges atomiques dans la mesure du temps.

#### *Corrigé*

**a.** La longueur d'un pendule de période $T_0$ est :

$$\ell_0 = g\left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 = 0{,}994 \text{ m.}$$

**b.** Si la température est diminuée de 20 °C, alors la longueur du pendule est modifiée. La nouvelle longueur est comprise entre $\ell_0 - 1.10^{-6} \times 20 \times \ell_0$ et $\ell_0 - 20.10^{-6} \times 20 \times \ell_0$. Cela donne une période $T_1$ comprise entre 1,999 60 s et 1,999 98 s.

*Remarque :* comme il s'agit d'une évaluation, il faut conserver un grand nombre de chiffres significatifs pour évaluer les incertitudes à la question précédente.

Si l'altitude augmente de 1 000 m, le champ de pesanteur prend la valeur $g - 3.10^{-6} \times 2\,000 \times g$. Cela donne une période $T_2 = 2{,}006\ 03$ s.

Si le pendule est transporté d'un pôle vers l'équateur, le champ de pesanteur prend la valeur $g - 0{,}007\ g$, ce qui donne la période $T_3 = 2{,}007\ 04$ s.

**c.** L'écart relatif, pour $T_1$, est compris entre $1.10^{-5}$ et $2.10^{-4}$. Pour $T_2$, il vaut $3.10^{-3}$, et $4.10^{-3}$ pour $T_3$.

*Remarque :* un seul chiffre significatif suffit pour ces écarts relatifs.

**d.** Le chronomètre de Harrison dérive d'une seconde tous les dix jours, soit un écart relatif de $1.10^{-6}$.

Les montres à quartz se décalent d'une seconde tous les six ans, soit un écart relatif de $5.10^{-9}$. L'horloge atomique, elle, présente une dérive relative de $10^{-15}$.

**e.** Le tableau indique que la précision de la mesure du temps a évolué du fil des progrès techniques.

| Dispositif | | Écart relatif |
|---|---|---|
| Pendule | dilatation | Entre $1.10^{-5}$ et $2.10^{-4}$ |
| | altitude | $3.10^{-3}$ |
| | latitude | $4.10^{-3}$ |
| Chronomètre de Harrison | | $1.10^{-6}$ |
| Montre à quartz | | $5.10^{-9}$ |
| Horloge atomique | | $10^{-15}$ |

**f.** Il s'agit d'expliquer pourquoi les définitions astronomiques ont été remplacées, donc il faut d'abord pointer leurs défauts, puis montrer en quoi la définition atomique du temps pallie ces défauts.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** La **stabilité** de la première définition officielle était insuffisante pour des besoins de **précision**. En effet, les **fluctuations** du jour solaire sur une année sont voisines de deux millisecondes pour un jour, et sont d'amplitude variable.

**2.** La deuxième définition, comme la première, était conditionnée à des **mesures astronomiques**, ce qui rend leur précision tributaire de la précision de ces mesures. En outre, la définition basée sur l'année tropique 1900 était arbitraire et peu pratique d'utilisation. Elle est survenue alors que les **horloges atomiques** existaient déjà.

**3.** Les **horloges atomiques** présentent la **stabilité** nécessaire à la mesure du temps et ne sont pas sensibles, *a priori*, à la température, à l'altitude et à la position sur la Terre.

### *Commentaire*

Le programme mentionne « Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps et la définition de la seconde ». On peut comprendre ceci comme « Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs sur la problématique de la mesure du temps **et** extraire et exploiter des informations sur la définition de la seconde ». Mais on peut aussi le comprendre comme « Extraire et exploiter des informations sur l'influence des phénomènes dissipatifs, **d'une part** sur la problématique de la mesure du temps **et d'autre part** sur la définition de la seconde ». Dans ce cas, il faut noter que l'influence des phénomènes dissipatifs sur la définition de la seconde est loin d'être capitale. L'évolution de la définition de la seconde n'est pas liée à des questions de dissipation, mais de stabilité. Et les causes d'instabilité incluent certes la dissipation, mais pas seulement.

## 2 Périodes de systèmes oscillants (p. 242)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale est un grand classique de la mécanique de lycée. Elle utilise du matériel simple à disposition de tous et permet une réflexion abordable à plusieurs niveaux. En Terminale S, une réflexion sur la précision des mesures effectuées est indispensable dans ces manipulations.

### *Correspondance avec le programme*

Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence les différents paramètres influençant la période d'un oscillateur mécanique et son amortissement.

### *Liste de matériel*

- Une potence, une noix, une tige.
- Une ficelle, des masses marquées, un mètre ruban, un rapporteur.
- Un ressort de raideur connue.
- Du carton.

### *Corrigé*

**a.** La mesure de $T$ passe par une mesure de plusieurs périodes, par exemple 10. L'incertitude doit être évaluée par l'élève en faisant des essais ; une incertitude sur les durées de $\Delta t = 0{,}5$ s est un minimum. Si l'on mesure $10T$, l'incertitude sur $T$ peut être évaluée à $\Delta T = 0{,}05$ s.

**b.** L'élève doit faire varier un seul paramètre à la fois et évaluer qualitativement l'influence du paramètre. Le fait que $T$ est indépendant de $m$ et peu dépendant de $\theta_0$ est facile à vérifier. La dépendance qualitative de la longueur conduit l'élève à faire des mesures plus systématiques, puis un tracé. L'indépendance des frottements peut être évaluée, une fois l'indépendance de $m$ constatée, en augmentant la prise au vent en fixant par exemple un bout de carton ; en revanche, l'élève doit constater la dissipation énergétique plus rapide lorsque les frottements se font sentir.

**c.** Un tracé de $T$ en fonction de $\sqrt{\ell}$ ou de $T^2$ en fonction de $\ell$ fait apparaître un modèle linéaire. Si le modèle n'est qu'affine, une réflexion sur des erreurs systématiques sur la mesure de la longueur devra être menée.

**d.** Le protocole aboutissant à la mesure de $k$ passe par des mesures de $T$ pour différentes valeurs de $m$ et un tracé de $T^2$ en fonction de $m$ (ou de $T$ en fonction de $\sqrt{m}$), modélisé par une fonction linéaire dont le coefficient directeur donne $k$.

Le caractère dissipatif des oscillations empêche d'utiliser ces dispositifs pour la mesure du temps à longue échéance.

## 3 Étude énergétique d'un système oscillant (p. 243)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale est également un classique des manipulations de lycée, faisant appel aux capacités de l'élève à manipuler l'outil informatique pour traiter une vidéo du point de vue mécanique. La formulation permet d'étudier soit un pendule pesant, soit un pendule élastique, soit les deux.

### *Correspondance avec le programme*

Pratiquer une démarche expérimentale pour étudier l'évolution des énergies cinétique, potentielle et mécanique d'un oscillateur.

### *Liste de matériel*

• Un ordinateur avec logiciel de pointage vidéo.

• Une ou plusieurs vidéos de paramètres connus présentant des oscillations de pendule pesant ou de pendule élastique horizontal ou vertical.

OU

• Le matériel permettant de produire ladite vidéo (webcam, pendules).

### *Corrigé*

**a.** Cette description d'échanges énergétiques est l'occasion de faire correspondre les états énergétiques des pendules aux positions sur la courbe. Pour un pendule élastique vertical, il y a deux énergies potentielles : élastique et de pesanteur.

L'énergie potentielle élastique est nulle lorsque le ressort passe par sa longueur à vide, l'énergie potentielle de pesanteur est nulle lorsque le mobile passe par sa position de référence (qui peut être prise à la hauteur de la position d'équilibre).

**b.** On étudie l'énergie cinétique, nulle ou maximale.

**c.** La période des oscillations est le double de la période de l'énergie cinétique ou de l'énergie potentielle élastique (et de l'énergie potentielle de pesanteur dans le cas du pendule pesant) et est égale à la période de l'énergie potentielle de pesanteur dans le cas du pendule élastique.

**d.** Il est nécessaire, pour ces vérifications, de connaître les paramètres des pendules (masse du mobile et raideur du ressort pour le pendule élastique notamment).

**e.** Les courbes peuvent présenter une décroissance de l'énergie mécanique. Dans ce cas, on conclut que la dissipation finit par arrêter le mouvement, mais on constate qu'elle n'influe pas sur la période.

# Exercices

## Applications

### 1 Pendule simple

**a.** La période du pendule est $T = 2\pi\sqrt{\dfrac{\ell}{g}} = 1{,}4$ s.

**b.** La longueur du pendule de période $T'$ est :

$$\ell' = g\frac{T'^2}{4\pi^2} = 0{,}99 \text{ m}.$$

**c.** À l'équateur, $g$ est plus petit, or $T$ est inversement proportionnelle à la racine carrée de $g$, donc $T$ est plus grande à l'équateur.

Les valeurs des périodes, pour le même pendule, peuvent s'écrire :

• à l'équateur : $T_{\text{é}} = \dfrac{k}{\sqrt{g_{\text{é}}}}$

• aux pôles : $T_{\text{p}} = \dfrac{k}{\sqrt{g_{\text{p}}}}$

où $k$ est une constante, et $g_{\text{p}}$ et $g_{\text{é}}$ les valeurs du champ de pesanteur respectivement aux pôles et à l'équateur. L'écart relatif s'écrit :

$$\frac{\left|T_{\text{é}} - T_{\text{p}}\right|}{T_{\text{é}}} = \left|\frac{\dfrac{1}{\sqrt{g_{\text{é}}}} - \dfrac{1}{\sqrt{g_{\text{p}}}}}{\dfrac{1}{\sqrt{g_{\text{é}}}}}\right| = 4 \cdot 10^{-3}.$$

### 2 Pendule élastique

**a.** Pour doubler $T$ sans changer $k$, il faut multiplier $m$ par 4.

**b.** Pour doubler $T$ sans changer $m$, il faut diviser $k$ par 4.

**c.** La raideur du ressort est $k = \dfrac{4\pi^2 m}{T^2} = 24$ N.m$^{-1}$.

### 3 Retard d'une horloge

**a.** La longueur de ce pendule est : $\ell = g\dfrac{T^2}{4p^2} = 0{,}99$ m.

**b.** Si la longueur augmente, la période augmente car $T$ est proportionnelle à la racine carrée de la longueur.

**c.** Au bout de 24 h, l'écart est :

$$24 \times 3\,600 \times \frac{2\pi}{\sqrt{g}}\left(\sqrt{\ell + 3.10^{-3}} - \sqrt{\ell}\right) = 2{,}6.10^2 \text{ s}$$

soit plus de quatre minutes.

### 4 De la Terre à la Lune

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 637.*

### 5 Comparaison de deux pendules

**a.** La période du second pendule est plus grande que celle du premier, donc le pendule le plus long est le deuxième pendule.

**b.** Les périodes respectives des pendules vérifient $9T_1 = 4T_2$, ce qui donne la relation suivante entre leurs longueurs $L_1$ et $L_2$ : $9\sqrt{L_1} = 4\sqrt{L_2}$.

Connaissant $L_1$, on en déduit $L_2 = L_1\left(\dfrac{9}{4}\right)^2 = 1{,}6$ m.

### 6 Métronome

**a.** Le métronome effectue 120 battements par minute, donc sa période est $T = 0{,}500$ s.

**b.** Sa fréquence est donc $f = 2{,}00$ Hz.

**c.** Si la masse est descendue, la longueur du pendule diminue donc, d'après l'expression de la période, celle-ci diminue, donc la fréquence augmente : les deux considérations sont bien en accord.

### 7 Exploitation de courbes

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 637.*

### 8 Pendule avec vitesse initiale

**a.** La courbe **a** a une valeur initiale non nulle : elle représente donc l'énergie cinétique. La courbe **b** a une valeur initiale nulle : elle représente l'énergie potentielle de pesanteur. La courbe **c** représente l'énergie mécanique, somme des deux autres.

**b.** L'énergie cinétique initiale est connue : $E_{c0} = 5{,}0$ mJ. On en déduit la masse :

$$m = \frac{2E_{c0}}{{v_0}^2} = 0{,}25 \text{ kg}.$$

La hauteur maximale atteinte est liée à l'énergie potentielle de pesanteur maximale $E_{ppmax} = 5{,}0$ mJ par la relation $E_{ppmax} = mgh$ ce qui donne :

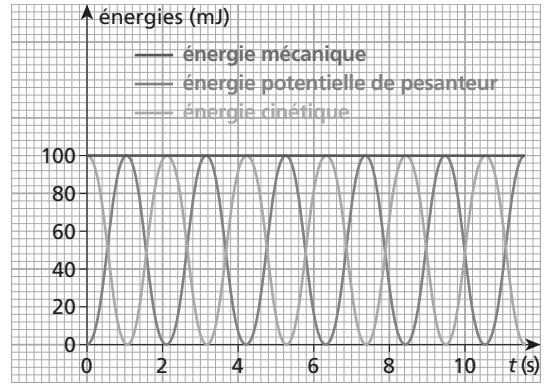
$$h = \frac{E_{ppmax}}{mg} = 2{,}0 \text{ mm}.$$

La période du pendule est $T = 4{,}8$ s, donc la longueur du pendule est $\ell = g\left(\dfrac{T}{2\pi}\right)^2 = 5{,}7$ m.

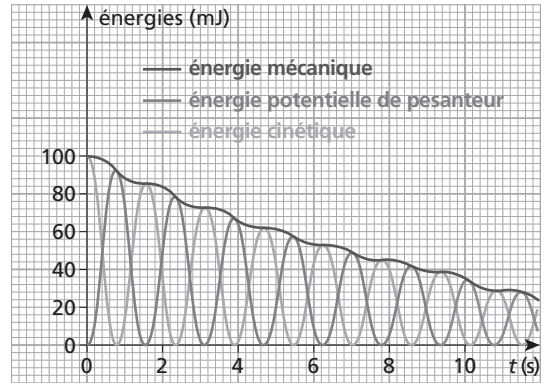
### 9 Tracé de courbes

**a.** Comme aucune force ne dissipe l'énergie mécanique, celle-ci reste constante au cours du temps.

**b.**




**c.**




## Entraînement

### 10 Oscillateurs et mesure du temps

**a.** Si l'horloge ne peut être facilement reliée à une source d'énergie, la dissipation fait qu'au bout d'un certain temps l'horloge s'arrête.

Lorsque l'horloge doit être embarquée à bord d'un satellite, ou positionnée à un endroit peu accessible ou où il faut particulièrement économiser l'énergie (pacemaker, phare isolé, base polaire), il faut absolument limiter la dissipation.

Une horloge comtoise n'a pas ce problème car elle est accessible et il suffit de remonter les poids pour lui redonner de l'énergie.

**b.** L'intérêt du refroidissement est qu'une fois refroidi, le saphir permet à l'énergie électromagnétique de ne pas être dissipée.

**c.** Au bout de deux ans de fonctionnement, la dérive est $3 \times 10^{-15} \times 2 \times 365 \times 24 \times 3\,600 = 2 \times 10^{-7}$ s.

**d.** En une seconde, l'erreur commise est,
$70 \times 3 \times 10^{-15} = 2 \times 10^{-13}$ km, soit, au bout de deux ans, un peu plus d'un centimètre. L'écart n'est donc pas significatif et l'horloge permet une bonne localisation.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Le **refroidissement** du saphir de l'**horloge** permet d'éviter la **dissipation d'énergie**.

**2.** En outre, cela garantit une **stabilité** à long terme permettant d'éviter la **dérive** du temps mesuré, donc de réduire les **erreurs sur la localisation** des sondes spatiales.

## 11 Période d'un pendule élastique

La raideur du ressort a la dimension $[k] = \dfrac{[F]}{\mathrm{L}}$.

D'après la deuxième loi de Newton, une force a pour dimension $[F] = \mathrm{M}[a] = \mathrm{M}\dfrac{\mathrm{L}}{\mathrm{T}^2}$.

Ainsi, la dimension de la raideur est $[k] = \mathrm{M.T}^{-2}$.

On en déduit que $\left[\sqrt{\dfrac{m}{k}}\right] = \left(\dfrac{\mathrm{M}}{\mathrm{M.T}^{-2}}\right)^{1/2} = (\mathrm{T}^2)^{1/2} = \mathrm{T}$.

L'expression de la période est bien homogène.

## 12 Dissipation et mesure du temps

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 637.*

## 13 Étude d'un pendule élastique

**a.** La courbe **a** est visiblement la somme des trois autres : c'est donc l'énergie mécanique. L'énergie potentielle élastique initiale du ressort est strictement positive, puisque le ressort est initialement allongé : il s'agit donc de la courbe **c**. L'énergie potentielle de pesanteur, seule, peut prendre des valeurs positives ou négative : c'est donc la courbe **d**. La courbe **b** représente donc l'énergie cinétique.
Comme la valeur initiale de l'énergie cinétique est nulle, la vitesse initiale de la masse marquée est nulle.
Comme la valeur initiale de l'énergie potentielle de pesanteur est négative, la masse marquée est initialement plus basse que sa position d'équilibre, donc le ressort est étiré.
L'allongement initial $x_0$ du ressort vérifie :

$E_{\text{péo}} = \dfrac{1}{2}kx_0^2$, avec $E_{\text{péo}} = 0{,}26$ J (énergie potentielle élastique initiale).

On en déduit : $x_0 = \sqrt{\dfrac{2E_{\text{péo}}}{k}} = 32$ cm.

**b.** Lue sur la courbe de l'énergie potentielle de pesanteur (courbe **d**), la pseudo-période vaut $T = 2{,}6$ s.

**c.** La valeur de $m$ s'en déduit : $m = k\left(\dfrac{T}{2\pi}\right)^2 = 0{,}85$ kg.

**d.** L'énergie mécanique (courbe **a**) n'étant pas constante, les frottements ne sont pas négligeables.

**e.** Pendant les cinq premières secondes, l'énergie mécanique passe de 0,26 J à 0,05 J, donc le travail des forces de frottement est – 0,21 J.

## 14 Analyse dimensionnelle *a priori*

**a.** L'unité de $g$ est le mètre par seconde carrée.

**b.** L'égalité $T = \alpha m^{\beta} \ell^{\gamma} g^{\delta}$ doit être homogène, ce qui donne l'équation aux dimensions $\mathrm{T} = \mathrm{M}^{\beta}\mathrm{L}^{\gamma}[g]^{\delta}$, soit encore $\mathrm{T} = \mathrm{M}^{\beta}\mathrm{L}^{\gamma}(\mathrm{L.T}^{-2})^{\delta}$. Les puissances de chaque dimension dans chaque membre doivent être les mêmes, ce qui donne les trois équations suivantes :

$$\begin{cases} \beta = 0 \\ \gamma + \delta = 0 \\ -2\delta = 1 \end{cases} \text{ système qui se résout en } \begin{cases} \beta = 0 \\ \gamma = \dfrac{1}{2} \\ \delta = -\dfrac{1}{2} \end{cases}.$$

Ainsi, l'expression de $T$ est $T = \alpha \ell^{1/2} g^{-1/2}$,

soit encore $T = \alpha\sqrt{\dfrac{\ell}{g}}$.

**c.** Le paramètre $\alpha$ reste inconnu, de même que la dépendance en $\theta_0$, car ce sont des grandeurs sans dimension, donc l'analyse dimensionnelle est inopérante.

## 15 Oscillations d'un quartz

**a.** Avec une fréquence $f_0 = 1$ Hz et une épaisseur $e = 1$ mm, le quartz devrait avoir la longueur

$$\ell = \sqrt{\frac{\alpha e}{f_0}} = 1 \text{ m}.$$

Il n'est pas envisageable de tailler un quartz d'un mètre de long (avec une épaisseur de 1 mm), et encore moins de l'insérer dans une montre. Voilà pourquoi les quartz sont réglés à la fréquence $f = 32\,768$ Hz.

**b.** La longueur du quartz est $\ell = \sqrt{\dfrac{\alpha e}{f}} = 5{,}511$ mm.

**c.** Avec $\Delta e = 1$ µm et $\Delta \ell = 1$ µm, on calcule $\dfrac{\Delta f}{f} = \dfrac{\Delta e}{e} + 2\dfrac{\Delta \ell}{\ell} = 1 \times 10^{-3}$. Au bout d'une journée, la dérive serait de $1 \times 10^{-3} \times 24 \times 3\,600 = 1 \times 10^2$ s, soit plus d'une minute. Ce n'est donc pas satisfaisant.

**d.** En réalité, le décalage est beaucoup plus faible, ce qui signifie que l'on a grossièrement surévalué les incertitudes sur les dimensions.

## Exercices de BAC

### 16 Étude d'un système solide-ressort

**1.a.** L'énergie cinétique s'écrit $E_c = \frac{1}{2}mv^2$, où l'énergie est en joules, la masse $m$ en kilogrammes et la vitesse $v$ en mètres par seconde.

**b.** L'énergie mécanique du système solide-ressort est $E_m = E_c + E_{pé} = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2$.

**c.** L'énergie mécanique initiale est $E_{m0} = \frac{1}{2}kx_0^2$.

**d.** Si tout frottement est négligeable, alors l'énergie mécanique du système est constante.

**e.** Lorsque le ressort n'est pas étiré et a la vitesse $v$, l'énergie mécanique du ressort s'écrit $E_m = \frac{1}{2}mv^2$, ce qui permet d'écrire, puisque l'énergie mécanique est constante, l'égalité suivante : $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$. On en déduit la vitesse du mobile à son passage en O :

$$v = x_0\sqrt{\frac{k}{m}}$$

**2.a.** La mesure de $3T_0$ donne 1,0 s, d'où l'on déduit $T_0 = 0{,}33$ s.

**b.** La masse du mobile est donc $m = k\left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 = 41$ g.

**c.** Le mouvement avec frottements présente des oscillations atténuées, dont la pseudo-période est égale à $T_0 = 0{,}33$ s.

**3.a.** La courbe ① représente la somme des deux autres : il s'agit donc de l'énergie mécanique. Le mobile étant lâché sans vitesse initiale, l'énergie cinétique initiale est nulle, donc l'énergie cinétique est représentée par la courbe ②. Le ressort étant initialement étiré, l'énergie potentielle élastique initiale est non nulle, donc l'énergie potentielle élastique est représentée par la courbe ③.

**b.** Les courbes de la **figure 4** présentent une décroissance de l'énergie mécanique, due à la dissipation par frottements.

**c.** L'énergie mécanique perdue est égale au travail des frottements. Il vaut donc, en une seconde :

$$6 - 75 = -69 \text{ mJ}$$

### 17 Les horloges

**1.a.** Comme $g$ est une accélération, sa dimension est $[g] = L.T^{-2}$.

Ainsi : $\left[\sqrt{\frac{\ell}{g}}\right] = L^{1/2}.[g]^{-1/2} = L^{1/2}.(L.T^{-2})^{-1/2} = T$

Il s'agit bien d'une durée.

**b.** L'écart relatif est $\frac{T - T_0}{T_0} = \frac{\alpha^2}{16} = 3.10^{-4}$

(ne pas oublier de convertir $\alpha$ en radians).

**c.** La période de cette horloge serait :

$$T_2 = T_1\sqrt{\frac{g_1}{g_2}} = 2{,}001 \text{ s.}$$

**d.** La position de l'horloge sur Terre influe sur la mesure qu'elle effectue, donc elle ne saurait convenir pour mesurer une longitude. En outre, le tangage perturbe le mouvement du pendule.

**2.a.** L'incertitude relative est :

$$\frac{15}{156 \times 24 \times 3\,600} = 1{,}1.10^{-6}.$$

**b.** L'écart de distance est alors :

$$\frac{2{,}6.10^4 \times 15}{24 \times 3\,600} = 4{,}5 \text{ km.}$$

L'écart peut donc être de plus de quatre kilomètres par jour, donc, sur un voyage de 156 jours, de plus de 700 km.

Cette mesure reste très imprécise.

**3.a.** Les inconvénients des horloges à balancier étaient leur faible précision et leur sensibilité aux conditions extérieures. Leur avantage était qu'elles étaient les seuls moyens mécaniques disponibles. Il en va de même pour le chronomètre de Harrison, même si sa précision était supérieure. Les visées solaires peuvent être très fiables, mais il faut néanmoins que le ciel soit dégagé pour pouvoir les faire (et elles ne sont rien sans une horloge fiable).

**b.** Les horloges atomiques étant extrêmement précises, les problèmes de précision de localisation évoquées dans cet exercice ne se posent plus.

## Rédiger une synthèse de documents

### 18 Une nouvelle définition de la seconde ?

*Analyse de la question*

Il s'agit de comprendre pourquoi la seconde aurait besoin d'être redéfinie en étudiant les raisons qui l'ont déjà fait redéfinir et les progrès technologiques récents permettant une nouvelle définition.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Les besoins de **précision** de la mesure du temps nécessitent une définition de la seconde faisant appel à une **référence** qui soit à la fois **précise** et **stable**. Voilà pourquoi, lorsque les **horloges au césium** ont atteint une précision suffisante dans les années 1960, elles ont servi d'étalon de mesure.

**2.** Néanmoins, ces horloges au césium présentent de légères **fluctuations** dues à l'**effet Doppler** subi par les atomes de césium de référence, qui sont en mouvement. Voilà pourquoi la précision de ces horloges est limitée.

Le **piégeage** d'atomes ou d'ions pour de nouvelles horloges permet de s'affranchir de ces problèmes. Les **progrès récents** dans la **précision relative** de telles horloges sont spectaculaires.

**3.** Ainsi, pour satisfaire aux besoins sans cesse accrus de précision et stabilité de la mesure du temps (pour les **GPS** par exemple), il est possible qu'une prochaine définition utilisera une **horloge optique**.

Chapitre 10

# Temps et relativité restreinte

## Introduction au chapitre (p. 258)

Ce chapitre vient clore la partie mécanique du programme, avec une introduction à la physique relativiste. Il est, par conséquent, indépendant des chapitres 5, 6, 7, 8 et 9 qui traitent de la physique classique.

Quelques notions sur les ondes vues dans les chapitres 2 et 3 sont reprises ici, avec notamment la vitesse de propagation, (puisqu'un point important de ce chapitre est de dire que la vitesse de la lumière, contrairement aux autres types d'ondes, ne dépend pas du référentiel), les interférences avec l'expérience de Michelson et Morley et aussi l'effet Doppler, traité en exercice en tenant compte de la dilatation du temps.

Il est important de noter que ce chapitre n'est qu'une introduction à la relativité, qu'il ne s'agit que de relativité restreinte et que seule la dilatation du temps doit être présentée. Nous avons néanmoins évoqué la contraction des longueurs dans l'exercice 12 d'approfondissement.

Une des difficultés de ce chapitre est l'absence d'expériences réalisables en classe : la relativité est présentée comme une « théorie », que des expériences historiques ont validée bien après. Le cours est donc présenté de la même façon, en insistant sur le fait que même si les résultats peuvent paraître « surprenants », ils ont tous été vérifiés par les physiciens.

Enfin, pour plus de clarté, les exercices ne traitent pas tous de cas réalistes. Certains contiennent par exemple des trains ou des fusées dont la vitesse est proche de celle de la lumière, alors que d'autres traitent de particules dont la vitesse est réellement proche de celle de la lumière.

Le but est d'aider l'élève à conceptualiser la dilatation du temps, ce qui nous a paru plus abordable avec certaines « expériences de pensée ».

## Activités

### 1 L'expérience de Michelson et Morley (p. 260)

#### *Objectif*

L'objectif de cette activité est de montrer comment l'invariance de la vitesse de la lumière a été expérimentalement mise en évidence.

L'expérience est présentée dans son contexte historique, en évoquant la notion d'éther et les différentes hypothèses qui furent émises quand aucune différence de marche ne fut mesurée.

Le but des questions posées est de mettre l'élève dans la même situation de pensée que celle des physiciens du début du vingtième siècle.

Cette activité n'est pas uniquement illustrative, puisque les élèves doivent savoir que des expériences ont validé, et valident toujours, la théorie de la relativité.

#### *Correspondance avec le programme*

Savoir que la vitesse de la lumière dans le vide est la même dans tous les référentiels galiléens.

#### *Corrigé*

**a.** Si l'interféromètre est immobile dans le référentiel de l'éther, les distances parcourues par la lumière sont identiques pour les deux miroirs ($L_1 = L_2 = 2L$ si $v = 0$), donc la différence de marche est nulle.

Ainsi les deux ondes qui interfèrent sont en phase, l'intensité est maximale et la frange centrale est lumineuse.

**b.** Si les distances $L_1$ et $L_2$ sont différentes, la différence de marche est non nulle, donc les interférences ne sont pas *a priori* constructives et l'intensité lumineuse n'est pas forcément maximale au centre : il n'y a pas forcément, à cet endroit, de frange lumineuse.

**c.** La vitesse de la Terre n'étant pas nulle, et la précision de la mesure étant très largement suffisante, c'est l'hypothèse selon laquelle la célérité de la lumière dans le référentiel terrestre est différente de sa célérité dans le référentiel de l'éther qui est fausse : la célérité de la lumière est égale à $c$ dans l'éther et dans le référentiel terrestre.

**d.** Si la vitesse de la lumière est égale à $c$ dans tous les référentiels, elle vaut donc $c$ dans le référentiel de l'interféromètre. Les deux allers et retours de la lumière sur chaque miroir sont alors strictement identiques, donc la différence de marche est bien nulle.

### *Commentaires*

• L'expérience historique était plus complète que ce qui est présenté ici : deux mesures ont été réalisées en tournant l'interféromètre de 90°, pour inverser les vitesses supposées différentes de la lumière pour chaque miroir, et ainsi doubler la différence de marche attendue au centre de l'écran.

• Cette activité peut être enrichie en faisant faire le calcul des différences de marche.

Pour le faisceau se réfléchissant sur $M_2$, la lumière va dans la direction de $\vec{v}$, dans le même sens puis dans le sens contraire, soit des vitesses égales à $c - v$ et $c + v$. La distance à parcourir étant égale à $L$ :

$$t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v}$$

ce qui se simplifie en $t_2 = \dfrac{2Lc}{c^2 - v^2} = \dfrac{2L}{c\left(1 - \dfrac{v^2}{c^2}\right)}$.

Pour le faisceau se réfléchissant sur $M_1$, l'aller et le retour sont symétriques, la vitesse $v$ étant constante. Dans le référentiel de l'éther, entre P et $M_1$, l'appareil s'est déplacé d'une distance égale à $vt$, donc la lumière doit parcourir la distance $\sqrt{L^2 + (vt)^2}$. La vitesse de la lumière étant $c$ dans ce référentiel, $t$ se calcule selon $t = \dfrac{\sqrt{L^2 + (vt)^2}}{c}$.

La relation précédente s'écrit aussi :

$c^2t^2 = L^2 + v^2t^2$ donc $t = \dfrac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}}$.

Comme $t_1 = 2t$, on a $t_1 = \dfrac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \dfrac{2L}{c\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$.

## 2 Effet relativiste pour le *Global Positioning System* (GPS) (p. 261)

### *Objectif*

L'objectif de cette activité est double : présenter le seul résultat quantitatif du cours, la différence entre durée propre et durée mesurée, et montrer que la relativité est présente dans notre environnement quotidien, en traitant le système GPS, qui est devenu un outil familier.

Quelques calculs sont demandés, et doivent être effectués avec le plus de chiffres significatifs possibles afin d'obtenir une différence entre les deux durées. Le but est de montrer que la dilatation du temps introduit, pour des vitesses faibles, des écarts de temps infimes qui, même s'ils sont négligeables dans la plupart des situations courantes, ne le sont plus pour un système aussi précis qu'est le GPS.

### *Correspondance avec le programme*

• Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.

• Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

### *Corrigé*

**a.** La durée mesurée dans le référentiel terrestre étant supérieure à la durée dans le satellite, tout se passe comme si le temps s'écoulait moins vite, d'où l'image de *dilatation du temps*.

**b.** Le calcul précis donne :

$$T - T_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{3870}{299\ 792\ 458}\right)^2}} - 1 = 8{,}332.10^{-11}\ \text{s}$$

**c.** Au bout d'un jour, l'écart est égal à :
$8{,}332.10^{-11} \times 24 \times 3\,600 = 7{,}199.10^{-6}$ s
soit 7,199 µs.

**d.** La vitesse de la lumière étant égale à $c$, l'écart de distance vaut $c\left(T - T_0\right)$, ce qui donne 2,498 cm au bout d'une seconde seulement ! La correction d'horloge est donc nécessaire pour une localisation précise (jusqu'à 10 cm pour les systèmes les plus perfectionnés).

Au bout d'une journée, l'écart de distance dépasse deux kilomètres : il vaut 2,158 km.

**e.** La période d'une radiation de césium est :

$$T_{\text{césium}} = \frac{1}{9\ 192\ 631\ 770} = 1{,}087\ 827\ 757.10^{-10}\ \text{s}.$$

Comme $T - T_0 = 8{,}332.10^{-11}$ s est du même ordre de grandeur, la différence est significative avec une telle précision : l'écart entre les deux durées sera supérieur à la précision de l'horloge au bout de quelques secondes.

**f.** L'écart entre $T_0$ et $T$ est d'autant plus grand que la vitesse est grande, mais dans la vie courante, les vitesses sont très faibles devant la vitesse de la lumière, si bien que l'écart est totalement négligeable. Par exemple, pour le TGV roulant à 360 km.h$^{-1}$, soit 100 m.s$^{-1}$, l'écart est :

$$T - T_0 = \frac{2 \times 3\ 600}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{100}{299\ 792\ 458}\right)^2}} - 2 \times 3\ 600 = 4.10^{-10}\text{s}.$$

Sur un trajet de deux heures (de Paris à Lyon, par exemple), cette durée est négligeable.

***Commentaires***

• Le système GPS subit aussi une correction de relativité générale, puisque le champ de gravité est différent entre le satellite et le sol.

• La relativité est connue de tous les élèves avec la fameuse formule $E = mc^2$. Ils en ont souvent l'idée d'une théorie très complexe. L'intérêt de présenter le GPS est de montrer que cette théorie est quasiment utilisée de nos jours par chacun d'entre nous !

• Pour la question **a.** le calcul de $T - T_0$ doit être effectué en une fois à la calculatrice : il ne faut pas calculer $T$, recopier la valeur, puis soustraire $T_0$.

## Exercices

*Remarque* : certains calculs demandés ici nécessitent un nombre de chiffres significatifs élevé. Exceptionnellement, il faut ici tolérer un tel nombre de chiffres significatifs pour que les résultats obtenus aient un sens.

## Applications

### 1 Navette spatiale

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 628.*

### 2 Vrai ou faux ?

**a.** Faux : la célérité est égale à $c$ dans ce référentiel.

**b.** Faux : la célérité de la lumière est aussi égale à $c$, même si la vitesse de la particule est très proche de $c$.

**c.** Faux : c'est la célérité de la lumière **dans le vide** qui est égale à $c$ dans tous les référentiels.

### 3 Voyage en train

**a.** La vitesse du TGV est $v = 88{,}9$ m.s$^{-1}$, donc la durée $T$ mesurée par l'observateur sur le bord de la voie est $T = \dfrac{T_0}{\sqrt{1 - \left(\dfrac{88{,}9}{3{,}00.10^8}\right)^2}} = T_0$.

(la différence entre les deux durées est :

$$T - T_0 = 4{,}4.10^{-14}\ T_0).$$

**b.** La différence de durée est totalement négligeable, donc la SNCF ne doit faire de correction relativiste.

### 4 Bactéries

**a.** Le temps $T$ nécessaire pour doubler la population de bactérie est une durée impropre. Dans le référentiel de l'engin, ce temps est $T_0 = 20$ jours (durée propre) et dans le référentiel terrestre :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{20}{\sqrt{1 - 0{,}995^2}} = 200 \text{ jours}.$$

**b.** Il y a donc cinq doublements de population pendant 1 000 jours.

**c.** Le nombre de bactéries à bord de l'engin est alors $2^6 = 64$ bactéries.

### 5 Particules radioactives

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 628.*

### 6 Mesure de vitesse

**a.** $T_0 = 100{,}0$ s correspond à une durée propre, la durée impropre est :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{100{,}0}{\sqrt{1 - \dfrac{(2{,}0.10^5)^2}{(3{,}00.10^8)^2}}} = 100 \text{ s}.$$

La différence est imperceptible.

**b.** De même :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{100{,}0}{\sqrt{1 - \dfrac{(2{,}0.10^8)^2}{(3{,}00.10^8)^2}}} = 134{,}2 \text{ s}.$$

**c.** Le caractère relatif du temps est à prendre en compte si la vitesse de l'engin est proche de celle de la lumière.

## Entraînement

### 7 Événements simultanés ?

**a.** La vitesse de la lumière dans le référentiel des vaisseaux est égale à $c$, puisque c'est la même dans tous les référentiels galiléens.

**b.** Les vaisseaux A et C sont fixes par rapport au vaisseau B, donc les événements sont simultanés dans le référentiel des vaisseaux.

**c.** La vitesse de la lumière est également égale à $c$ dans le référentiel de la Terre, et c'est justement pour cette raison que les événements ne sont pas simultanés, puisque le sens du mouvement des vaisseaux n'est pas le même que le sens de propagation de la lumière.

**d.** L'événement 1 se produit avant l'événement 2 dans le référentiel de la Terre, puisque le vaisseau A a une vitesse de sens opposé au déplacement de la lumière.

### 8 Train relativiste

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 628.*

### 9 Allô, la Terre ?

**a.** La vitesse de la lumière est égale à $c$ dans tous les référentiels galiléens, donc c'est la vitesse de la lumière pour l'astronaute à bord de la fusée et aussi pour un occupant de la base.

**b.** L'intervalle de temps d'une seconde est un intervalle de temps propre, puisqu'il est mesuré dans le référentiel où les événements (émission de deux flashs successifs) ont lieu au même endroit.

**c.** Si $T_0 = 1{,}00$ s, l'intervalle de temps pour un observateur terrestre est :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{1{,}00}{\sqrt{1-\dfrac{\left(2{,}5.10^8\right)^2}{\left(3{,}00.10^8\right)^2}}} = 1{,}8 \text{ s.}$$

### 10 Voyage vers la Lune

**a.** Pour un observateur terrestre, la durée du voyage est $T = \dfrac{d}{v} = \dfrac{3{,}84.10^8}{1{,}0.10^4} = 3{,}8.10^4$ s (environ 11 h).

**b.** Cette durée est une durée impropre puisque les événements « la fusée part de la Terre » et « la fusée arrive sur la Lune » n'ont pas lieu au même endroit dans le référentiel terrestre.

**c.** La durée $T_0$ du voyage pour un passager de la fusée est une durée propre, donc :

$$T_0 = T\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 3{,}8.10^4 \times \sqrt{1-\left(\frac{1{,}0.10^4}{3{,}00.10^8}\right)^2} = 3{,}8.10^4 \text{ s.}$$

La différence est imperceptible.

**d.** Si la vitesse de la fusée est $v = 0{,}80c$, la durée du voyage est $T = \dfrac{d}{v} = \dfrac{3{,}84.10^8}{0{,}80 \times 3{,}00.10^8} = 1{,}6$ s pour un observateur terrestre, et la durée $T_0$ du voyage pour un passager de la fusée est :

$$T_0 = T\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} = 1{,}6 \times \sqrt{1-0{,}80^2} = 0{,}96 \text{ s.}$$

La différence est ainsi perceptible car la vitesse du déplacement est proche de celle de la lumière.

### 11 Le muon dans tous ses états

**a.** $T_0$ correspond à la « demi-vie » propre car c'est une durée mesurée entre deux événements ayant lieu au même endroit dans le référentiel des muons.

**b.** Sans tenir compte de la dilatation du temps, le nombre de muons au niveau de la mer est :

$N = 563 \times \mathrm{e}^{-0{,}69 \times \frac{6{,}4}{1{,}5}} = 30$ muons, ce qui est très nettement inférieur à la valeur mesurée.

**c.** Dans le calcul précédent, la « demi-vie » mesurée n'est pas la « demi-vie » propre, puisque les muons ne sont pas fixes dans le référentiel de la Terre.

**d.** La « demi-vie » mesurée est :

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = \frac{1{,}5}{\sqrt{1-0{,}995^2}} = 15 \text{ ms,}$$

donc le calcul exact donne :

$N = 563 \times \mathrm{e}^{-0{,}69 \times \frac{6{,}4}{15}} = 419$ muons, ce qui correspond aux mesures, aux incertitudes près.

**e.** Dans le référentiel des muons, le temps nécessaire $t_0$ pour atteindre le niveau de la mer est une durée propre, donc :

$$t_0 = t\sqrt{1-\left(\frac{v^2}{c^2}\right)} = 6{,}4 \times \sqrt{1-0{,}995^2} = 0{,}64 \text{ ms,}$$

ce qui donne $N = 563 \times \mathrm{e}^{-0{,}69 \times \frac{0{,}64}{1{,}5}} = 419$ muons.

## Approfondissement

### 12 Contraction des longueurs

**a.** Les événements sont « l'électron entre dans le tube » et « l'électron sort du tube ».

**b.** Les événements ont lieu au même endroit dans le référentiel de l'électron (ils ont lieu au niveau de l'électron).

**c.** La durée propre $T_0 = 1{,}0.10^{-10}$ s est la durée de la traversée du tube dans le référentiel de l'électron, et la durée impropre $T = 1{,}0.10^{-5}$ s est mesurée dans le référentiel du laboratoire.

Or $T = \dfrac{T_0}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$, donc $v = c\sqrt{1-\left(\dfrac{T_0}{T}\right)^2}$ soit

$v = 3{,}00.10^8 \times \sqrt{1-\left(\dfrac{1{,}0.10^{-10}}{1{,}0.10^{-5}}\right)^2} = 3{,}0.10^8\ \text{m.s}^{-1}$.

La vitesse des électrons est extrêmement proche de celle de la lumière, ils ont donc une vitesse maximale.

**d.** Pour l'électron, il ne reste dans le tube que pendant la durée propre, inférieure à la durée impropre, donc le tube lui paraît moins long. En écrivant $T = \dfrac{L}{v}$ et $T_0 = \dfrac{L'}{v}$ il vient $\dfrac{L'}{L} = \dfrac{T_0}{T}$, soit $L' = \sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}L < L$.

### 13 La lumière ne vieillit pas

**a.** La grandeur $\dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$ tend vers l'infini si $v$ tend vers $c$, donc la durée mesurée $T$ tend vers l'infini.

**b.** Comme $T$ tend vers l'infini : le temps s'écoule infiniment lentement pour la lumière, qui ainsi ne « *vieillit pas* ».

### 14 Poursuite d'engins spatiaux

**a.** L'intervalle de temps $t_1 - 0$ est une durée propre puisqu'il correspond à des événements ayant lieu au même endroit dans le référentiel de la Terre.

**b.** L'horloge de l'engin lent indique une durée impropre puisque les événements ont lieu à des endroits différents dans le référentiel de l'engin. Cette durée est : $t'_1 = \dfrac{t_1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}} = \gamma t_1$ en notant $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$.

**c.** La vitesse de la Terre par rapport à l'engin étant $v$, la Terre s'est éloigné de $vt'_1 = \gamma v t_1$.

**d.** L'intervalle de temps $t_2 - 0$ est impropre puisque les événements se produisent à des endroits différents dans le référentiel terrestre.

**e.** Dans le référentiel lié à l'engin lent, les événements « la Terre passe près de l'engin à $t' = 0$ » et « le super-engin rattrape l'engin lent à $t'_2$ » ont lieu au même endroit.
L'intervalle de temps $t'_2$ est une durée propre donc $t_2 = \gamma t'_2$ et l'horloge de l'engin indique $t'_2 = \dfrac{t_2}{\gamma}$.

**f.** La durée de la poursuite est donc, dans le référentiel de l'engin lent, $T = t'_2 - t'_1 = \dfrac{t_2}{\gamma} - \gamma t_1$.

## Exercices de BAC

### 15 Expérience de Michelson et Morley

**1.a.** Pour aller de la lame au miroir, la distance à parcourir est égale à $L$, donc $t_A = \dfrac{L}{c-v}$.
La distance à parcourir étant également $L$ pour aller du miroir à la lame, $t_B = \dfrac{L}{c+v}$.

**b.** On en déduit :

$$t_2 = t_A + t_B = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v} = \frac{2Lc}{c^2-v^2}.$$

**c.** La longueur d'un aller-retour étant égale à $2L$, la durée est $t_1 = \dfrac{2L}{V} = \dfrac{2L}{\sqrt{c^2-v^2}}$.

**2.a.**

$$t_1 = \frac{2L}{\sqrt{c^2-v^2}} = \frac{2\times 10{,}0}{\sqrt{\left(3{,}00.10^8\right)^2 - \left(3{,}00.10^4\right)^2}}$$

$$= 6{,}666\ 666\ 700.10^{-8}\ \text{s}$$

$$t_2 = \frac{2Lc}{c^2-v^2} = \frac{2\times 10{,}0\times 3{,}00.10^8}{\left(3{,}00.10^8\right)^2 - \left(3{,}00.10^4\right)^2}$$

$$= 6{,}666\ 666\ 733.10^{-8}\ \text{s}$$

**b.** La différence de marche est alors :

$$\delta = c\left(t_2 - t_1\right) = 9{,}9.10^{-8}\ \text{m}.$$

La différence de marche étant non nulle, les deux ondes seront déphasées l'une par rapport à l'autre, et l'intensité ne sera pas forcément maximale.
Les franges ainsi obtenues permettront de connaître cette différence de marche.

**c.** Cette différence de marche correspond à une fraction $\dfrac{d}{\lambda} = \dfrac{10{,}0\times\left(3{,}00.10^4\right)^2}{6{,}00.10^{-7}\times\left(3{,}00.10^8\right)^2} = \dfrac{1}{6}$ de longueur d'onde.

**d.** Ce déplacement est très largement supérieur à 0,01, donc l'expérience permet de valider le modèle de l'éther, si celui-ci est correct.

**e.** En réalité, la vitesse de la lumière est aussi égale à $c$ dans le référentiel de l'interféromètre (et dans tout autre référentiel), donc la différence de marche est nulle ainsi que le déplacement de franges.

### 16 Mesurer la vitesse de la lumière

**a.** La lumière n'a pas de masse.

**b.** La lumière est réfractée par les faces du prisme, selon les lois de Descartes. Si la vitesse de la lumière varie, l'indice du prisme également donc l'angle de réfraction n'est pas constant.

**c.** La vitesse de la lumière dans le référentiel terrestre est égale à $c$, et ceci quelle que soit la vitesse de l'étoile qui l'émet.

**d.** La vitesse de la lumière ne variant pas, l'indice et la déviation sont bien constants.

**e.** Si le prisme est en mouvement, la vitesse de la lumière est également la même dans le référentiel du prisme, donc la déviation est encore constante.

**f.** Michelson et Morley ne purent rien mesurer pour la même raison : la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de la Terre.

## 17 Effet Doppler relativiste

**a.** En ne considérant que la dilatation du temps :

$$T = \gamma T_0.$$

**b.** La lumière se propageant à la célérité $c$, un observateur terrestre estime que la lumière d'un éclair parcourt une distance $d_1 = cT$ durant l'intervalle entre deux éclairs.

**c.** La distance parcourue par la navette est $d_2 = vT$ selon l'observateur terrestre.

**d.** La distance séparant deux éclairs consécutifs est ainsi $\lambda' = cT - vT$, soit $\lambda' = \gamma(c - v)T_0$.

**e.** La période $T'$ est alors $T' = \dfrac{\lambda'}{c}$,

soit $T' = \gamma T_0 \dfrac{c - v}{c}$, ce qui s'écrit également :

$$T' = T_0 \frac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}\left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

$$= T_0 \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \dfrac{v}{c}\right)\left(1 + \dfrac{v}{c}\right)}}\left(1 - \frac{v}{c}\right)$$

$$= T_0 \sqrt{\frac{1 - \dfrac{v}{c}}{1 + \dfrac{v}{c}}}.$$

**f.** La fréquence étant l'inverse de la période :

$$f' = f_0 \sqrt{\frac{1 + \dfrac{v}{c}}{1 - \dfrac{v}{c}}},$$

soit $f' = 8{,}0.10^{14} \times \sqrt{\dfrac{1 + 0{,}2}{1 - 0{,}2}} = 9{,}8.10^{14}$ Hz.

## 18 Mesurer la dilatation du temps

*Analyse de la question*

La question demande d'expliquer pourquoi la théorie de la relativité n'a pas pu être vérifiée dès sa publication, et pourquoi seuls certains progrès technologiques réalisés plus tard ont permis cette confirmation expérimentale.

Elle invite à utiliser l'activité 2 page 261, portant sur le GPS, ainsi que le document 2, traitant des horloges à haute précision. Elle nécessite donc de montrer qu'un infime écart de durée n'est mesurable qu'avec une horloge suffisamment précise.

*Piste de réponses et mots-clés*

**1.** Il faut commencer par expliquer que pour des **vitesses très faibles** devant la célérité de la lumière, l'écart entre les durées propre et mesurée est très **faible**. Il est possible de faire une application numérique avec par exemple la vitesse d'un satellite GPS pour trouver un écart de l'ordre de $10^{-11}$ s pour une durée propre de 1 seconde.

**2.** Ensuite, dire que cet écart de durée n'est **mesurable** avec une horloge que si sa **précision** est bien inférieure à l'écart à mesurer. Dans le cas contraire, l'écart mesuré est nul ce qui ne permet pas de confirmer la théorie de la relativité.

**3.** Enfin citer quelques horloges construites grâce aux avancées technologiques récentes, comme **l'horloge au césium**, dont la précision ne cesse de s'améliorer (bientôt $10^{-16}$ s). Ainsi des écarts de durée extrêmement faibles sont devenus mesurables, et ont permis la **vérification expérimentale** de la théorie de la relativité.

Chapitre 11

# Temps et évolution chimique

## Introduction au chapitre (p. 276)

Ce chapitre fait partie du thème *Comprendre*. Pour la première fois sans doute, l'élève va être amené à s'intéresser à l'approche cinétique en étudiant l'évolution temporelle des systèmes chimiques et les paramètres pouvant influencer celle-ci (informations cruciales pour les industriels).

Ce chapitre aborde dans un premier temps la question du suivi temporel des réactions chimiques. Le programme mentionne notamment le suivi par CCM, très fréquent en laboratoire de synthèse organique pour suivre l'évolution d'une réaction. Cette opération permet de décider du moment où passer aux phases de traitement ou de constater que la réaction ne se déroule pas et qu'il est donc nécessaire de modifier les conditions expérimentales. L'activité 1 propose une mise en œuvre de ce type de suivi, conformément aux exigences du programme.

La durée d'une réaction, qui correspond à la durée nécessaire pour que le système passe de son état initial à son état final, est estimée grâce à ces suivis : il s'agit d'une notion pratique que le programme a choisi de mettre en avant, même si, en toute rigueur, une réaction n'est jamais terminée. Les courbes obtenues au cours de suivis quantitatifs présentent des asymptotes : les réactions correspondantes sont considérées comme terminées quand la différence entre les courbes et leurs asymptotes ne peut plus être mesurée.

Attention, au chapitre 20, la durée de réaction est définie comme un paramètre expérimental, correspondant au temps que l'expérimentateur donne à la réaction pour se faire, et non plus, comme ici, à une caractéristique de la réaction dans les conditions données.

Le programme mentionne, par ailleurs, le temps de demi-réaction, qui n'est déterminé que graphiquement en Terminale.

Dans un second temps, l'influence de différents facteurs sur l'évolution des systèmes chimiques est étudiée. Les connaissances exigibles concernent les facteurs : « concentration, température, solvant ». Nous avons ajouté également la présence d'un catalyseur, mais il existe d'autres facteurs cinétiques tels que :

• l'état de surface d'un réactif solide. Par exemple, lors de la réaction entre le zinc métallique et l'acide chlorhydrique, la durée de la réaction diminue lorsque le zinc se présente sous la forme d'une fine poudre, plutôt qu'en bloc, car cela augmente la surface de contact entre les réactifs.

• l'éclairement. Par exemple, certains pigments picturaux se dégradent plus rapidement s'ils sont exposés à des rayonnements ultraviolets que s'ils sont exposés à un rayonnement visible (photosensibilisation), d'où la mise en place de protections et d'éclairages spéciaux dans les musées.

La catalyse présente un grand intérêt dans les milieux biologiques comme dans le domaine industriel. Les documents proposés au sein des activités et des exercices du chapitre l'illustrent par des exemples concrets. Le chapitre 17, sur la chimie durable, permettra un réinvestissement de cette notion de catalyse dans la mesure où celle-ci constitue justement un des piliers de la chimie verte.

Ce chapitre ressemble donc, par certains aspects, au chapitre de cinétique du programme de 2002. La différence essentielle tient à l'absence de la notion de vitesse de réaction que le nouveau programme ne mentionne pas, aux dires de ses concepteurs, pour que l'accent ne soit pas porté sur les calculs associés à cette notion. Les exercices sur les comparaisons de coefficients directeurs sont donc abandonnés, de même qu'il ne sera pas question de la différence entre vitesse d'apparition d'un produit ou de disparition d'un réactif et vitesse de réaction.

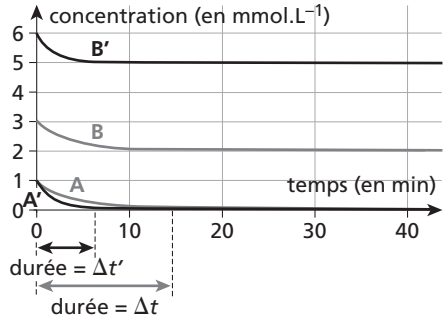
Cela suppose de prendre quelques précautions pour la question des facteurs cinétiques.

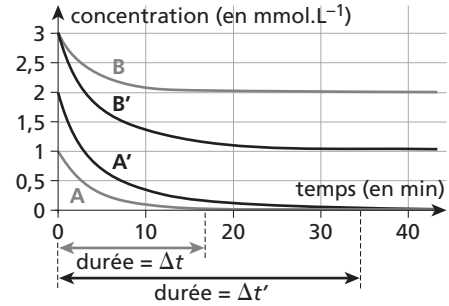
En effet, avec le programme de 2002, un facteur cinétique était défini comme un paramètre influençant la vitesse de réaction avec, en arrière-plan, l'idée simple que plus ce paramètre est grand (concentration, température, catalyseur), plus la vitesse de réaction augmente. Les conséquences étaient multiples, comme la diminution de la vitesse avec le temps. Le seul usage de la durée de réaction ne permet pas cette présentation simple puisque l'augmentation de la concentration d'un réactif diminue la durée de la réaction quand ce réactif est en excès alors qu'il l'augmente quand il est en défaut.

Les figures suivantes considèrent le cas d'une réaction A + B → produits.

La figure de gauche représente l'évolution des quantités de A et de B dans une situation de référence (courbes noires A et B) et dans la même situation mais avec plus de B (courbes grises A′ et B′).

La figure de droite représente de même l'évolution des quantités de A et de B (situation de référence) et la même situation mais avec plus de A (courbe grises A′ et B′).




La première figure montre que l'augmentation de la concentration initiale du réactif en excès (B) provoque la diminution de la durée de la réaction ($\Delta t > \Delta t'$) alors que la deuxième met en évidence que l'augmentation de la concentration du réactif limitant (A) a pour conséquence une augmentation de la durée de la réaction ($\Delta t < \Delta t'$).

Pour reprendre les termes du programme qui parle de « paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction chimique », nous avons donc défini un facteur cinétique comme un paramètre susceptible de faire varier la durée (ou l'évolution temporelle) de la réaction.

De même, le programme actuel n'exige pas, contrairement au précédent, de faire référence à la sélectivité des catalyseurs : il n'en a donc pas été fait mention dans ce chapitre. En revanche, au chapitre 20, les réactifs chimiosélectifs sont considérés.

## Activités

### 1 Suivi d'une synthèse (p. 278)

***Objectif***

Le but de cette activité est de suivre l'évolution d'une synthèse organique grâce à des CCM réalisées à différentes dates.

Le programme préconise, à de nombreuses reprises, d'établir des liens avec la biologie : la synthèse choisie est, pour cette occasion, la préparation de l'acide acétylsalicylique, un des principes actifs de médicament les plus utilisés dans le monde. Cette synthèse était d'ores et déjà couramment menée dans les précédents programmes de lycée.

Nous avons pris le parti de proposer qu'elle ne soit réalisée que sur la paillasse du professeur. En effet, l'élution de chaque CCM étant assez longue, il nous a paru plus judicieux que les élèves mettent en commun leurs résultats : chaque binôme peut venir dessiner au tableau l'allure du chromatogramme qu'il a obtenu.

Ici, comme au laboratoire de synthèse organique, ce suivi par CCM permet de décider du moment où commencer les traitements dont seul le professeur aura la responsabilité.

Cette activité peut être menée de pair avec la suivante, les élèves n'ayant finalement qu'une seule CCM à réaliser chacun.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour suivre dans le temps une synthèse organique par CCM et en estimer la durée.

### *Liste du matériel et des produits*

**Pour la paillasse du professeur :**

- Une pissette d'eau.
- Un agitateur magnétique chauffant avec son barreau aimanté.
- Un bain-marie.
- Un ballon bicol avec un bouchon (250 mL).
- Réfrigérant à eau.
- Des supports/potences pour le montage.
- Un thermomètre.
- Une pipette pour les prélèvements.
- Un chronomètre.
- Un filtre Büchner.
- Une capsule de pesée.
- Une pipette graduée de 10 mL.
- Une poire d'aspiration.
- Une pipette simple.

**Pour la paillasse de l'élève :**

- Une cuve de chromatographie.
- Des plaques de CCM (une plaque par binôme).
- Des capillaires de chromatographies

### *Liste des produits*

**Pour la paillasse du professeur :**

- Solution d'acide sulfurique à 2 $mol.L^{-1}$.
- Acide salicylique (masse molaire : 138 $g.mol^{-1}$).
- Anhydride éthanoïque (masse molaire : 102 $g.mol^{-1}$).
- Solution alcoolique d'acide salicylique.
- Solution alcoolique d'acide acétylsalicylique de référence.

**Pour la paillasse de l'élève :**

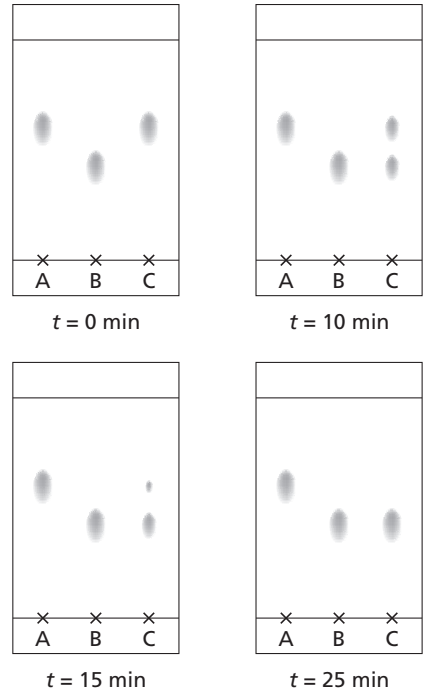
- Éluant : 2 volumes de cyclohexane pour 1 volume d'acide méthanoïque et 3 volumes d'acétate de butyle (quelques mL pour chaque binôme).

### *Corrigé*

**a.** $C_7H_6O_3 + C_4H_6O_3 \rightarrow C_9H_8O_4 + C_2H_4O_2$

**b.** Lorsqu'il n'y a plus d'évolution entre deux plaques successives, la réaction est terminée et il est possible de procéder à la filtration.

**c.** Au début, le mélange réactionnel (C) ne contient que le réactif (A) et pas le produit (B). Puis, une tache correspondant au produit apparaît, tandis que celle correspondant au réactif disparaît. Au bout de 25 minutes, il ne semble plus y avoir d'évolution : la durée de la réaction est donc estimée à 25 minutes (ou plus précisément, comprise entre 15 min et 25 min).




À chaque fois, le dépôt de gauche est l'acide salicylique, celui du milieu l'acide acétylsalicylique de référence et le dernier le brut réactionnel.

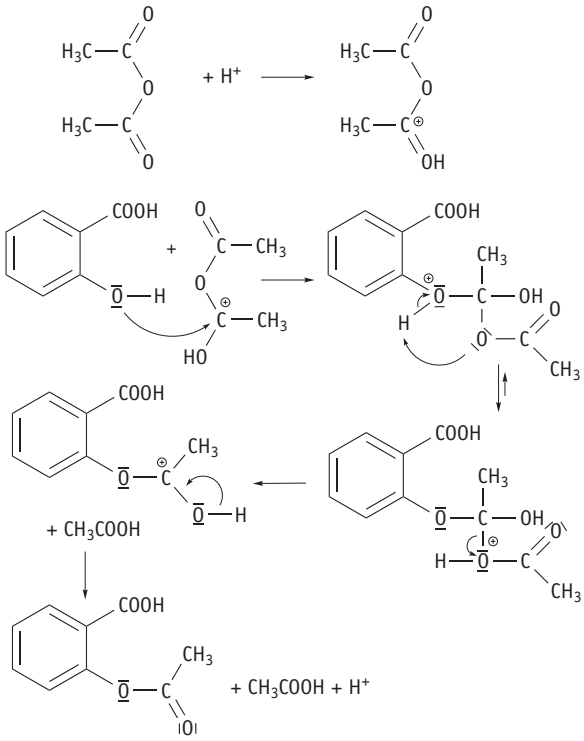
**d.** Toutes les espèces sont incolores et il n'y a aucune modification du système chimique observable directement ; le suivi par observation directe est donc impossible.

En revanche, la CCM permet de mettre en évidence la disparition de l'acide salicylique et l'apparition de l'ester.

### *Commentaires*

- L'estérification de l'acide salicylique est réalisée grâce à un anhydride d'acide : la réaction est alors quasi-totale tandis que les phénols ne réagissent pas avec les acides carboxyliques.

• Le mécanisme de la réaction est le suivant :




• L'élution des CCM est assez longue.

• La révélation sous UV montre que l'acide salicylique (référence déposée en A) migre davantage que l'acide acétylsalicylique (référence déposée en B).

• Au bout de 25 minutes, il n'y a plus d'évolution entre les deux plaques et la tache correspondant à l'acide salicylique dans le mélange réactionnel a disparu (voir le dépôt C au dernier chromatogramme p. 135).

## 2 Influence de facteurs cinétiques (p. 279)

### *Objectif*

Cette activité permet de mettre en évidence l'influence des facteurs cinétiques température et concentration d'un réactif sur la durée de la réaction. Elle étudie la décoloration lente de la phénolphtaléine à pH élevé. Elle sera réalisée pour trois concentrations différentes en ions hydroxyde (les élèves ont à préparer deux solutions filles à partir d'une solution mère fournie) à température ambiante.

Dans un deuxième temps, la durée de cette réaction est mesurée pour la concentration la plus faible en ions hydroxyde mais à une température supérieure à la température ambiante.

Pour mener à bien cette activité, il est important que les élèves pensent que l'influence d'un paramètre ne peut être testée que si les autres paramètres d'influence supposés sont maintenus constants : cela leur est donc rappelé dans le bloc d'aide.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mettre en évidence quelques paramètres influençant l'évolution temporelle d'une réaction chimique : concentration, température.

### *Liste de matériel*

• Une pissette d'eau distillée.
• Au moins deux béchers de 50mL ou de 100 mL.
• Deux fioles jaugées de 100 mL avec leurs bouchons.
• Des pipettes jaugées de 20 et 25 mL.
• Une propipette.
• Une éprouvette graduée de 50 mL.
• Une agitateur magnétique (chauffant si possible, sinon, prévoir de fournir les bains d'eau chaude aux élèves).
• Un barreau aimanté.
• Un chronomètre.
• Un bain-marie.

### *Liste des produits*

• Solution d'hydroxyde de sodium à 2,0 mol.$L^{-1}$ (environ 100 mL par binôme).
• Solution de phénolphtaléine en compte-gouttes.

### *Corrigé*

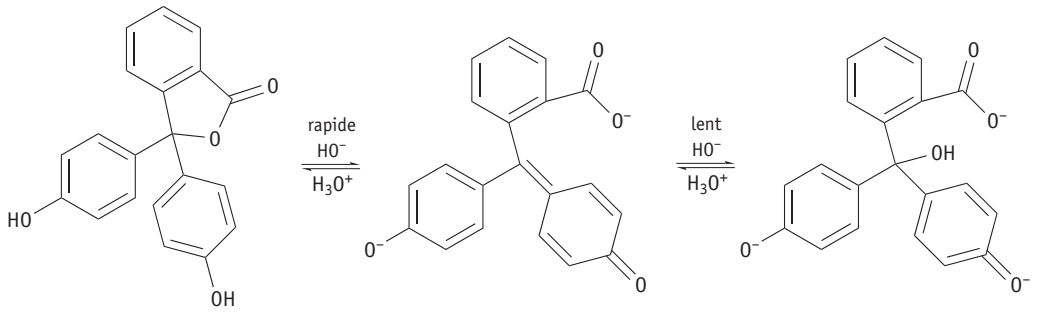
**a.** Lorsque la concentration en ions hydroxyde augmente, la durée de la réaction de décoloration de la phénolphtaléine est plus courte.

**b.** Cette nouvelle valeur peut être comparée à celle obtenue à la concentration de 0,40 mol.$L^{-1}$ mais à température ambiante.

**c.** La température a également une influence sur la durée de la réaction : lorsque la température augmente, la durée de la réaction est plus faible.
Pour montrer cette influence, il faudrait refaire l'expérience en gardant la même concentration en ions hydroxyde mais en changeant la température.

### *Commentaires*

• La phénolphtaléine est un indicateur coloré acido-basique qui peut exister sous trois formes différentes. D'ordinaire, ce sont les transformations rapides entre la forme incolore A et la forme rose B qui sont exploitées mais ici, la réaction étudiée est la réaction lente de la forme rose B avec les ions hydroxyde pour des pH supérieurs à 12.




Forme incolore A — Forme rose B — Forme incolore C

• À température ambiante, avec la solution $S_0$, la décoloration dure environ 1 minute contre 6 minutes avec $S_1$ et 9 minutes avec $S_2$.
À 40 °C, la décoloration dure environ 3 minutes avec $S_2$.

• La réponse à la question **a.** (diminution de la durée de la réaction pour une concentration plus grande en ions $HO^-$) est en lien avec le fait que, dans cette réaction, les ions $HO^-$ sont en excès. Cette information peut ne pas être détaillée en première approche, mais si ce TP est réalisé à la fin du chapitre, la remarque est pertinente. Avec une solution de même pH mais de concentration plus grande en phénolphtaléine, la décoloration prendrait au contraire plus de temps.

---

## 3 Catalyses homogène, hétérogène et enzymatique

**(p. 280 et 281)**

### *Objectif*

Cette activité expérimentale est complétée par une étude documentaire qui pourra être préparée (ou terminée) par les élèves à la maison si besoin.

Dans un premier temps, les élèves mènent des expériences leur permettant de mettre en évidence le phénomène catalytique dans le cas de la décomposition du peroxyde d'hydrogène. Ils sont ainsi conduits à distinguer les trois types de catalyse et à les définir eux-mêmes à partir de leurs observations.

Dans un second temps, un document à propos des enzymes anti-oxydantes (dont fait partie la catalase, étudiée dans la première partie) est fourni aux élèves. Conformément à la demande du programme, ces derniers peuvent ainsi se rendre compte de l'intérêt de la catalyse enzymatique dans les milieux biologiques. Cette partie est l'occasion de réinvestir des connaissances des classes de Seconde et de Première S sur les structures de Lewis mais également de travailler sur la compétence « Extraire et exploiter des informations ».

Cette compétence pourra à nouveau être mise en jeu au travers des exercices 10, 11, 15, 17, 19 et 20 ainsi que dans l'exercice résolu A, qui illustrent l'importance cruciale de la catalyse en s'appuyant sur des exemples pris en biologie ou dans le domaine industriel.

### *Correspondance avec le programme*

• Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mettre en évidence le rôle d'un catalyseur.

• Extraire et exploiter des informations sur la catalyse, notamment en milieu biologique et dans le domaine industriel, pour en dégager l'intérêt.

### *Liste de matériel*

• Une pissette d'eau distillée.
• 2 béchers de 50 mL.
• Des bûchettes et allumettes éventuellement.
• 3 tubes à essais.
• Une pipette simple.
• Une coupelle ou lame de verre éventuellement.

### *Liste des produits*

• Eau oxygénée à 30 volumes.
• Eau oxygénée à 20 volumes.
• Solution de chlorure de sodium à 0,3 $mol.L^{-1}$.
• Solution de chlorure de fer (III) à 0,1 $mol.L^{-1}$.
• Un disque platiné utilisé pour la désinfection des lentilles cornéennes ou fil platiné.
• Une rondelle de radis ou viande hachée crue éventuellement.

### *Corrigé*

**a.** Le gaz pourrait être identifié avec une bûchette enflammée puis éteinte : en présence de dioxygène, la flamme serait ravivée. Il ne faut pas hésiter à laisser s'accumuler le gaz pour qu'il y en ait suffisamment.

**b.** Sans platine, il n'y a pas de réaction et quand il y a réaction, c'est sur le platine qu'a lieu le dégagement gazeux.

**c.** L'aspect du disque platiné n'est pas modifié après la réaction : il n'a donc pas été consommé.

**d.** $2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2$

**e.** Sans ions $Fe^{3+}$, l'effervescence n'est pas observée : le système n'évolue pas et il n'y a pas de réaction. La comparaison des tubes 1 et 2 permet donc d'affirmer que ces ions sont responsables de la réaction, et pas les ions $Cl^-$, présents dans les deux tubes. De plus, la comparaison des tubes 2 et 3, qui ont le même aspect en fin de réaction, à savoir la couleur caractéristique des ions $Fe^{3+}$, nous informe que ces ions n'ont pas été consommés.

**f.** Ces ions catalysent donc la réaction de décomposition du peroxyde d'hydrogène.

**g.** En l'absence de rondelle de radis ou de sang, c'est-à-dire en l'absence de catalase, il n'y a pas d'effervescence, ce qui signifie que le peroxyde d'hydrogène ne se décompose pas. La catalase est donc responsable de la décomposition du peroxyde d'hydrogène.

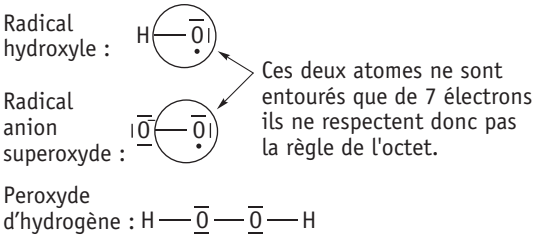
**h.** Sur une peau saine, l'eau oxygénée n'entre pas en contact avec du sang et n'est donc pas mise en présence de catalase. Sur une blessure, en l'absence de la barrière de la peau, l'eau oxygénée est versée sur du sang, qui contient de la catalase.

**i.** La catalyse est hétérogène si le catalyseur et les réactifs forment un mélange hétérogène.

La catalyse est homogène si le catalyseur et les réactifs forment un mélange homogène, donc s'ils sont dans la même phase, généralement dissoute.

La catalyse est enzymatique si le catalyseur est une enzyme.

**j.**




**k.** Les réactions impliquant l'anion (le radical anion, pour être précis) superoxyde ou le radical hydroxyle sont rapides si bien que, en l'absence de régulation de la formation de ces radicaux, les dommages causés aux cellules sont très vite importants.

**l.** La production d'enzymes anti-oxydantes permet de réguler rapidement la formation des espèces oxygénées réactives et d'éviter que celles-ci ne causent trop de dommages dans les cellules.

### *Commentaires*

• Le peroxyde d'hydrogène est instable car il peut se dismuter. En effet, il appartient à deux couples rédox : $O_2/H_2O_2$ et $H_2O_2/H_2O$.

La réaction qui a lieu est alors :

$$2H_2O_2 \rightarrow O_2 + 2H_2O,$$

si bien que la concentration des solutions de peroxyde d'hydrogène est parfois indiquée en volumes. Une solution à $x$ volumes correspond au dégagement de $x$ litres de dioxygène par la décomposition d'un litre de solution dans les conditions normales de température et de pression.

Toutefois, cette réaction est très lente à température ambiante et en l'absence de catalyseur.

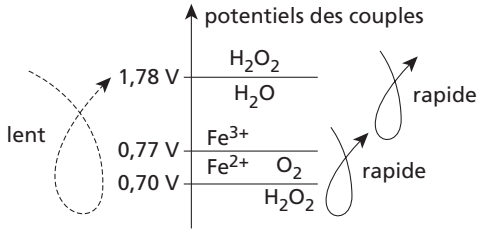
• Le peroxyde d'hydrogène existe naturellement chez les êtres vivants comme sous-produit de la respiration cellulaire. Ainsi, dans le corps humain, il inhiberait la synthèse de pigments, dont la mélanine, et serait responsable du blanchissement des cheveux. Pour se protéger des effets de $H_2O_2$, tous les organismes aérobies possèdent des enzymes, appelées *peroxydases* (dont fait partie la catalase mentionnée dans la troisième partie de l'activité), qui catalysent sa dismutation.

Dans la deuxième partie de l'activité, cette dismutation est catalysée par les ions fer (III). Il s'agit d'une catalyse rédox. En effet, le catalyseur est ici l'oxydant d'un couple dont le potentiel de référence (0,77 V) est compris entre ceux des deux couples oxydant/réducteur du peroxyde d'hydrogène (1,78 V et 0,70 V : voir le schéma suivant). Le catalyseur permet donc de substituer deux réactions rapides (l'une entre le peroxyde d'hydrogène réducteur et les ions fer (III), l'autre entre le peroxyde d'hydrogène oxydant et les ions fer (II)) à une réaction lente :

$$H_2O_2 + 2Fe^{3+} \rightarrow O_2 + 2Fe^{2+} + 2H^+$$

puis $\quad H_2O_2 + 2Fe^{2+} + 2H^+ \rightarrow 2H_2O + 2Fe^{3+}$.

Lorsque ces deux équations sont sommées, le bilan est celui de la dismutation du peroxyde d'hydrogène : les ions fer (III), consommés au cours d'une des étapes de la réaction, sont bien régénérés dans l'autre.




• L'épreuve expérimentale de bac n° 7 (p. 580-581 du manuel de l'élève) porte sur un dosage du peroxyde d'hydrogène présent dans un produit d'entretien pour lentilles, avant et après ajout d'un comprimé de « neutralisation » qui contient de la catalase. Les élèves sont amenés, au cours de ce TP, à utiliser leurs résultats expérimentaux et à les compléter par des informations extraites des documents fournis pour montrer qu'une fois la désinfection des lentilles réalisée par le peroxyde d'hydrogène, l'action de la catalase permet d'éliminer ce réactif dangereux. Ce TP pourra être traité en révisions, une fois le chapitre 19 abordé.

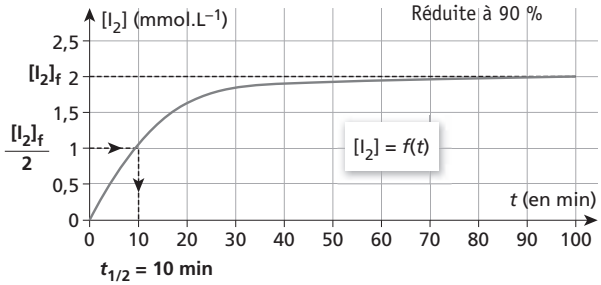
# Exercices

## Applications

### 1 Réaction entre l'eau oxygénée et les ions iodure

**a.** D'après l'équation de la réaction, $n = x$.

**b.** Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ est la durée au bout de laquelle l'avancement atteint la moitié de sa valeur finale. $x(t_{1/2}) = \frac{x_f}{2}$.



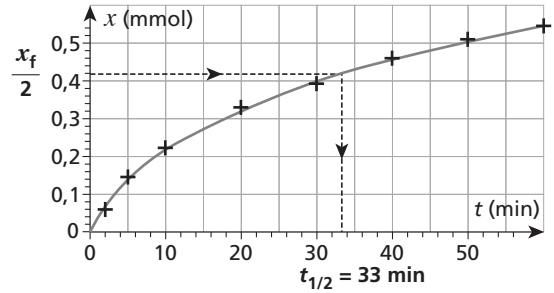

$[I_2]_f = \frac{x_{max}}{V}$ et $[I_2]_{t_{1/2}} = \frac{\frac{x_{max}}{2}}{V}$.

Ainsi, $[I_2]_{t_{1/2}} = \frac{[I_2]_f}{2} = 1{,}00$ mmol.L$^{-1}$.

Sur le graphe, l'abscisse correspondant à 1,00 mmol.L$^{-1}$ est le temps de demi-réaction : $t_{1/2} = 10$ min.

### 2 Suivi cinétique

**a.**




**b.** Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour atteindre la moitié de l'avancement final. Il n'est pas possible de déduire l'avancement final ni de la courbe précédente ni des données du problème puisque l'état final n'y apparaît pas.

**c.** L'avancement $\frac{x_f}{2} = 0{,}42$ mmol est atteint pour $t_{1/2} = 33$ min.

### 3 Durée d'une réaction

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 637.*

### 4 Facteurs cinétiques

**a.** Un facteur cinétique est un paramètre influençant la durée de réaction.

**b.** Non, le volume de la solution n'est pas un facteur qui influe sur la durée de réaction.

**c.** La température et la concentration des réactifs sont des facteurs cinétiques.

### 5 Décomposition de l'eau oxygénée

**a.** La réaction chimique est lente car elle ne se fait pas lors du mélange des réactifs.

**b.** La température est un facteur cinétique : toutes choses étant égales par ailleurs, si la température diminue, la durée de la réaction augmente. L'allure de la courbe serait donc la même que celle de la courbe 1 (même état initial) mais la décroissance serait plus lente et la concentration en peroxyde d'hydrogène atteindrait la valeur nulle plus tard.

**c.** Il n'est pas possible de répondre car deux facteurs cinétiques sont modifiés simultanément et de manière antagoniste.

## Entraînement

### 6 Oxydation d'un colorant par les ions hypochlorite

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 637.*

## 7 Maturation d'un vin

**a.** D'après la position des taches, l'échantillon A contient les deux acides.
L'échantillon B ne contient pas d'acide malique tandis que l'échantillon C ne contient pas d'acide lactique. L'échantillon B correspond donc au vin bon à mettre en tonneau.

**b.** L'échantillon le plus jeune ne contient pas d'acide lactique (résultat de la transformation malolactique) ; c'est l'échantillon C qui a donc 3 jours.
L'échantillon qui contient les deux acides est un vin en cours de maturation : l'échantillon A a 12 jours.
L'échantillon qui ne contient plus d'acide malique a fini sa maturation : il s'agit de l'échantillon B, qui a donc 28 jours.

**c.** À partir de ces chromatogrammes, on peut simplement affirmer que cette durée est comprise entre 12 et 28 jours.

## 8 Réaction entre l'eau oxygénée et les ions iodure

**a.** Il est possible de suivre qualitativement la réaction grâce aux changements de couleur liés à la formation de diiode : plus la réaction est avancée, plus il s'est formé de diiode et plus la couleur est intense.

**b.**

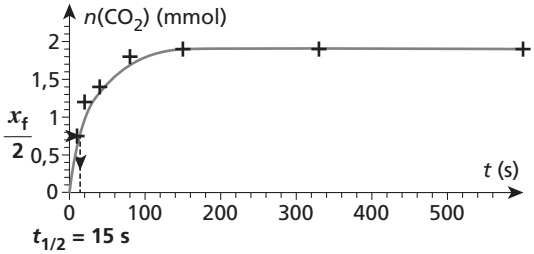
| | A | B | C |
|---|---|---|---|
| Concentration initiale en peroxyde d'hydrogène $[H_2O_2]_0$ (mol.L$^{-1}$) | $1{,}0.10^{-3}$ | $2{,}0.10^{-3}$ | $4{,}0.10^{-3}$ |
| Concentration initiale en ions iodure $[I^-]_0$ (mol.L$^{-1}$) | $1{,}0.10^{-3}$ | $1{,}0.10^{-3}$ | $1{,}0.10^{-3}$ |

Le paramètre dont l'influence est observée ici est le paramètre variable donc la concentration initiale en eau oxygénée. C'est un réactif en excès, il est attendu que la durée de la réaction diminue de A à B et de B à C. Les autres paramètres fixés sont la température et la concentration initiale en ions iodure.

**c.** Au bout d'une même durée, si davantage de produit s'est formé, c'est que la réaction est plus avancée donc cela correspond à une durée (totale) moindre. La teinte de la solution contenue dans le bécher 3 étant plus soutenue, c'est dans ce bécher que la durée de la réaction de formation de $I_2$ est la plus courte.
La concentration en réactif est un facteur cinétique : plus la concentration en réactif en excès est élevée, plus la durée de formation de $I_2$ est courte. Le bécher 3 est donc le bécher C.

## 9 Détartrage d'une cafetière

**a.** Voir le tableau ci-dessous.
$n(CO_2) = x$.




$x_f = 1{,}9$ mmol.

**b.** Le tartre étant le réactif limitant, d'après les nombres stœchiométriques, sa quantité de matière initiale est égale à la quantité de matière finale de dioxyde de carbone :
$m = x_f\, M$ où $M$ est la masse molaire du tartre
$m = 1{,}9.10^{-3} \times 100{,}1 = 0{,}19$ g.

L'état final est atteint après 150 s environ : la durée $\tau$ du détartrage peut donc être estimée à 2 min30.

**c.** Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour atteindre la moitié de l'avancement final, donc ici pour $\frac{x_f}{2} = 9{,}5.10^{-4}$ mol, $t_{1/2} = 15$ s.

**d.** La concentration des réactifs est un facteur cinétique : toutes choses étant égales par ailleurs, la réaction sera plus courte avec une solution plus concentrée du réactif en excès.
La température étant un facteur cinétique, si le détartrage était effectué à chaud, sa durée serait réduite.

| Équation chimique | | $CaCO_{3(s)}$ + $2C_3H_6O_{3(aq)}$ → $CO_{2(g)}$ + $Ca^{2+}_{(aq)}$ + $2C_3H_5O_3^-{}_{(aq)}$ + $H_2O_{(l)}$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| État du système | Avancement (mol) | Quantités de matière (mol) | | | | | |
| État initial | $x = 0$ | $n_1$ | $n_2$ | 0 | 0 | 0 | solvant |
| État intermédiaire | $x$ | $n_1 - x$ | $n_2 - 2x$ | $x$ | $x$ | $2x$ | solvant |
| État final | $x_f$ | $n_1 - x_f = 0$ | $n_2 - 2x_f$ | $x_f = n_1$ | $x_f$ | $2x_f$ | solvant |

### 10 Obtention de prostaglandines

**a.** Les noms des enzymes se terminent souvent par « ase ». Ici, trois enzymes sont mentionnées : la désaturase, la cyclo-oxygénase et l'élongase.

**b.** Les enzymes sont les catalyseurs du monde vivant et, comme tous les catalyseurs, elles ne sont pas consommées au cours des réactions.

**c.** La cyclo-oxygénase catalyse la réaction qui conduit de EPA à PG-E3. Sans elle, la réaction serait sans doute trop lente pour être observée et PG-E3 ne pourrait être formée.

### 11 La digestion

**a.** Les enzymes sont des catalyseurs biologiques qui participent au processus chimique de la digestion. Les enzymes mentionnées sont l'amylase, les protéases, la lipase et la maltase.

**b.** Digestion des glucides : amylase et maltase.

Digestion des protéines : protéases.

Digestion des lipides : lipase.

**c.** Cette enzyme se trouve dans les sucs pancréatique. Si elle est présente à des taux anormaux, cela est sans doute lié à un mauvais fonctionnement du pancréas.

**d.** Les enzymes opèrent plus rapidement et dans des conditions beaucoup plus douces (acidité moindre et température plus faible). Il s'agit donc d'un système particulièrement efficace.

### 12 Types de catalyse

**a.** La catalyse est homogène si les réactifs et le catalyseur forment un mélange homogène.

La catalyse est hétérogène si les réactifs et le catalyseur forment un mélange hétérogène.

**b.** Réactifs et catalyseur formant un mélange homogène, il s'agirait de catalyse homogène.

**c.** Réactifs et catalyseur formant un mélange hétérogène, il s'agirait de catalyse hétérogène.

### 13 Décomposition de l'acide méthanoïque

**a.** Un catalyseur diminue la durée d'une réaction, sans apparaître dans son bilan.

Si le catalyseur et les réactifs forment un mélange homogène, il s'agit de catalyse homogène.

**b.** Cela signifie que c'est un catalyseur.

**c.** Le catalyseur n'est pas consommé au cours de la réaction alors que l'acide méthanoïque l'est.

**d.** Le catalyseur formant un mélange hétérogène avec le réactif, il s'agit de catalyse hétérogène.

### 14 Décoloration du bleu de méthylène

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 637.*

### 15 Le luminol au service de la police scientifique

**a.** Pour l'expérience où seuls du luminol et de l'eau oxygénée sont mélangés, le système chimique n'évolue pas (ce qui est bien le cas si un des réactifs nécessaires n'est pas présent, hypothèse d'Alice) ou ne semble pas évoluer (la réaction peut être très lente en l'absence de catalyseur, hypothèse de Laure).

Pour l'expérience où du luminol, de l'eau oxygénée et des ions $Fe^{3+}$ sont mélangés **(Fig. 1)**, l'émission de lumière montre qu'il y a eu une évolution : s'il manquait un réactif et qu'il a été fourni, il y a bien réaction (hypothèse d'Alice).

En présence d'un catalyseur, une réaction peut devenir suffisamment rapide pour qu'une évolution soit observée (hypothèse de Laure).

**b.** Si les ions $Fe^{3+}$ jouaient le rôle de réactifs, ils seraient consommés au cours de la réaction et leur quantité de matière diminuerait.

S'ils étaient catalyseurs, ils seraient consommés puis intégralement restitués : leur quantité de matière serait la même à l'état initial et à l'état final.

Ici, les ions $Fe^{3+}$ jouent donc le rôle de catalyseurs.

**c.** $Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+} + e^-$

$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightleftharpoons 2H_2O$

Donc $H_2O_2 + 2H^+ + 2Fe^{2+} \rightleftharpoons 2H_2O + 2Fe^{3+}$.

Les ions $Fe^{2+}$ sont réactifs ici car ils sont consommés au cours de la réaction.

**d.** Les données trouvées par les élèves indiquent que l'hémoglobine du sang contient des ions fer (II). Or, ceux-ci, après oxydation en ions fer (III), catalysent la réaction entre le luminol et l'eau oxygénée, si bien qu'il n'y a émission d'une lumière bleue que si du sang est présent.

En criminologie, des traces de sang peuvent ainsi être détectées grâce aux ions fer (II) présents.

## Approfondissement

### 16 Évolution de la concentration d'un réactif

**a.** Pour $t = 0$, $c = \dfrac{a}{1 + b \times 0} = a$ et $c = c_0$ donc $a = c_0$.

**b.** La fin de la réaction correspond à $t$ très grand, c'est-à-dire tendant vers l'infini.

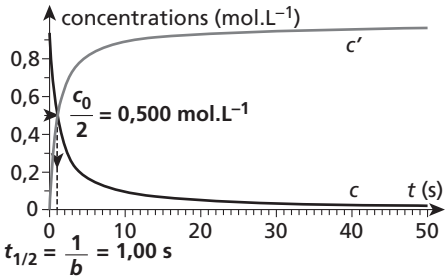
Or $c$ tend vers 0 lorsque $t$ tend vers l'infini (donc l'équation $c = f(t)$ fournie implique que l'iodure de méthyle n'est pas en excès).

**c.** Le temps de demi-réaction est la durée nécessaire pour atteindre la moitié de l'avancement final. Pour pouvoir travailler sur le temps de demi-réaction, il faut avoir l'expression de $t$ en fonction des autres paramètres, soit $c(1+bt) = c_0$ ou $t = \dfrac{\frac{c_0}{c} - 1}{b}$.

Pour $t_{1/2}$, par définition, $c = \dfrac{c_0}{2}$ donc $t_{1/2} = \dfrac{1}{b}$.

La concentration $c_0$ n'apparaît pas dans l'expression de $t_{1/2}$. Le temps de demi-réaction est donc, dans cette situation, indépendant de la concentration initiale.

**d.** Le tracé de la courbe peut être obtenu avec un tableur ou par une étude analytique comme en cours de mathématiques. Le résultat est le même (courbe noire).




**e.** $CH_3I + HO^- \rightarrow CH_3OH + I^-$

**f.** À partir d'un tableau d'avancement ou directement, puisque la stœchiométrie de la réaction et simple, il est possible d'écrire :

$$c' = c_0 - c = c_0 - \frac{c_0}{1+bt} = \frac{c_0(1+bt) - c_0}{1+bt} = \frac{c_0 bt}{1+bt}.$$

**g.** Voir le graphe ci-dessus (courbe grise).

## Exercices de BAC

### 17 Dégradation de l'alcool dans le foie

**1.a.** • L'éthanol est un alcool (suffixe ol, —OH) possédant deux atomes de carbone (racine éthan-) : sa formule semi-développée est donc $CH_3—CH_2—OH$, tandis que sa formule brute est $C_2H_6O$.

• L'éthanal est un aldéhyde (suffixe al, —CHO), de formule semi-développée $CH_3—CH{=}O$ et de formule brute $C_2H_4O$.

• L'ion éthanoate est la base conjuguée de l'acide éthanoïque et a donc pour formule semi-développée $CH_3—COO^-$ et pour formule brute $C_2H_3O_2^-$.

• Les demi-équations associées à ces couples sont :

$C_2H_6O \rightleftharpoons C_2H_4O + 2H^+ + 2e^-$

$C_2H_4O + H_2O \rightleftharpoons C_2H_3O_2^- + 3H^+ + 2e^-$

La demi-équation associée au couple $O_2/H_2O$ est :

$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightleftharpoons 2H_2O$.

• Les équations correspondant aux réactions d'oxydation par le dioxygène sont :

– pour l'éthanol :

$2C_2H_6O + O_2 \rightleftharpoons 2C_2H_4O + 2H_2O$ (3)

– pour l'éthanal :

$2C_2H_4O + O_2 \rightleftharpoons 2C_2H_3O_2^- + 2H^+$.

**b.** La demi-équation associée au couple $C_{21}H_{26}N_7O_{14}P_2^+/C_{21}H_{27}N_7O_{14}P_2$ est :

$C_{21}H_{26}N_7O_{14}P_2^+ + H^+ + 2e^- \rightleftharpoons C_{21}H_{27}N_7O_{14}P_2$.

**c.** En utilisant les notations données dans l'énoncé, la demi-équation précédente s'écrit :

$NAD^+ + H^+ + 2e^- \rightleftharpoons NADH$.

**d.** Grâce aux demi-équations écrites aux questions **a.** et **c.**, l'équation d'oxydation de l'éthanol par $NAD^+$ s'écrit :

$C_2H_6O + NAD^+ \rightleftharpoons C_2H_4O + NADH + H^+$ (4)

**e.** D'après ce qui précède, l'oxydation de NADH par le dioxygène s'écrit :

$2NADH + O_2 + 2H^+ \rightleftharpoons 2NAD^+ + 2H_2O$ (5)

L'équation (3) peut être obtenue en ajoutant l'équation (4), affectée d'un coefficient 2, à l'équation (5).

On constate alors que $NAD^+$ n'intervient plus dans ce bilan : il est consommé dans une cellule mais, ailleurs dans l'organisme, il est ensuite régénéré.

**f.** NADH est une enzyme alors que $NAD^+$ est un réactif de l'étape (1) (les biochimistes l'appellent coenzyme car c'est le réactif adapté à l'enzyme, ce que $O_2$ n'est pas, par exemple).

**2.a.** Le texte indique que la personne alcoolique possède plus de MEOS que la personne sobre.

**b.** La dégradation de l'alcool est donc plus rapide chez un alcoolique que chez une personne sobre car MEOS contribue aussi à éliminer l'éthanol.

**c.** En cas de forte consommation d'alcool, deux voies de dégradation de l'éthanol sont mises en jeu avec deux systèmes enzymatiques : cela permet d'accélérer l'oxydation de l'alcool alors que pour l'éthanal, quelle que soit la quantité présente dans l'organisme, il n'y a qu'une seule enzyme.

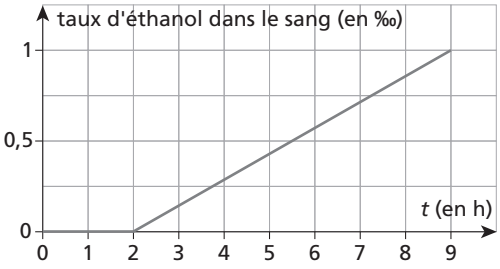
**d.** Chez ces personnes, après consommation d'éthanol, il y a bien oxydation en éthanal mais celui-ci n'est pas oxydé et s'accumule. Or, d'après les pictogrammes de sécurité, l'éthanal est toxique. Ces personnes peuvent donc ressentir plus gravement les effets secondaires d'une consommation excessive d'alcool.

**3.** Dans cette partie, on suppose, pour simplifier, que l'assimilation et l'élimination de l'éthanol ont lieu successivement.

**a.** L'élimination de l'alcool commence une heure après l'arrêt de la consommation.

Il faut 6 h 30 pour que tout l'alcool soit éliminé. Cette durée ne sera plus courte que si le taux d'alcool initial est plus faible (la température est fixée, la quantité d'enzymes aussi).

**b.** Jusqu'à $t = 2$ h, il n'y a pas eu oxydation de l'éthanol donc pas de formation d'éthanal. Ensuite, d'après l'équation de la réaction, il y a formation d'une mole d'éthanal pour une mole d'éthanol consommée.




## 18 Synthèse

**1.** Dans cet exercice, $H_2O$ peut être traité comme solvant ou pas ; cela ne change que l'information portée dans le tableau d'avancement et le choix fait n'a pas de conséquence pour le travail.

| | A + 2B → C + $H_2O$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| Avancement | Quantités de matière | | | |
| $x = 0$ | $n_{0,A}$ | $n_{0,B}$ | 0 | 0 |
| $x$ | $n_{0,A} - x$ | $n_{0,B} - 2x$ | $x$ | $x$ |
| $x_f$ | $n_{0,A} - x_f$ | $n_{0,B} - 2x_f$ | $x_f$ | $x_f$ |

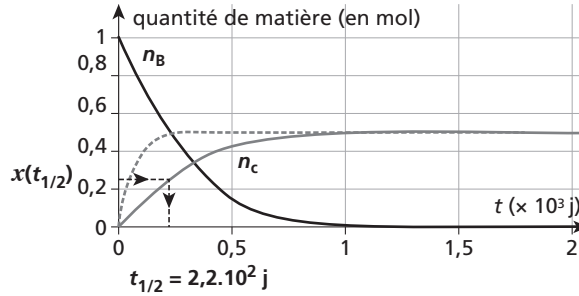
*L'avancement des quantités de matière sont exprimés en mol.*

**2.** $n_C = x$ et $n_B = n_{0,B} - 2x$.

Ainsi, $n_B = n_{0,B} - 2n_C$ soit $n_C = \dfrac{n_{0,B} - n_B}{2}$.

**3.** La relation précédente permet de calculer la quantité de C connaissant celle de B, lue sur le graphe.

| $n_B$ (mol) | 1,0 | 0,80 | 0,60 | 0,40 | 0,20 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n_C$ (mol) | 0 | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 |




**4.** Le temps de demi-réaction $t_{1/2}$ correspond à la durée nécessaire pour que l'avancement atteigne la moitié de sa valeur finale.

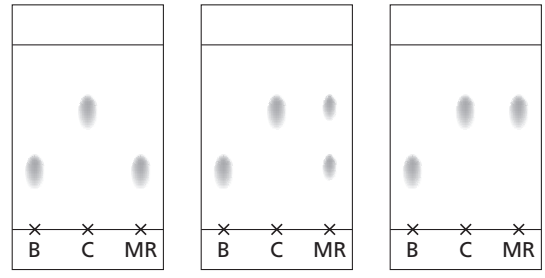
Soit $x(t_{1/2}) = \dfrac{x_f}{2}$. Ici $x(t_{1/2}) = \dfrac{n_{C_f}}{2} = 0{,}25$ mol.

Par lecture graphique, sur la courbe donnant la quantité de C au cours du temps, $t_{1/2} = 2{,}2.10^2$ jours.

**5.** Initialement, il n'y a que B et pas C.

À $t = 500$ j, la réaction n'est pas terminée mais est plus avancée que sur le chromatogramme donné : il y a donc moins de B mais plus de C.

À $t = 1\,500$ j, la réaction est terminée : il n'y a plus de B mais seulement C.




à $t = 0$ à $t = 500$ j à $t = 1\,500$ j

**6.a.** Pour écourter la durée de la synthèse, il est possible de jouer sur les facteurs cinétiques : en particulier, on peut augmenter la température.

**b.** Voir la courbe tracée en pointillés.

## 19 Lessive aux « enzymes gloutons »

**a.** Oui car ce sont des enzymes, donc des catalyseurs : elles ne sont pas consommées pendant le lavage.

**b.** Ces molécules sont transformées par réaction avec l'eau et ne sont donc pas présentes à la fin du lavage.

*Remarque* : il est possible, pédagogiquement, d'expliquer aux élèves ce qui se passe lors du lavage avec les représentations de l'énoncé de l'exercice 11.

**c.** Comme le montre le tableau, chaque enzyme a un rôle spécifique et ne peut donc catalyser qu'un seul type de réaction. Pour être efficace pour le nettoyage de taches de différentes natures, il faut donc incorporer plusieurs types d'enzymes.

**d.** Les colorants ne sont ni des protéines, ni des microfibres de cellulose, ni de la graisse ni de l'amidon (voir cours de 1re S sur les colorants).

La présence des enzymes ne les affectent donc pas.

**e.** La gélatine étant une protéine, elle a réagi avec l'eau en présence des protéases de la lessive.

**f.** Il faudrait qu'il reste de la gélatine dans l'eau.

## 20 Synthèse industrielle d'acide nitrique

**a.** Les deux métaux utilisés sont le platine et le rhodium.

**b.** Les éléments chimiques Pt et Rh ne figurent pas dans le tuyau de sortie du réacteur.

**c.** Les réactifs sont les espèces apportées dans le tuyau qui entre dans le réacteur ($NH_3$ et $O_2$).

Les produits sont les espèces chimiques qui sortent du réacteur et qui y ont donc été formées : NO et $H_2O$.

L'équation de cette synthèse est donc :

$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$.

**d.** Voir le tableau suivant.

| | Avancement | $4NH_3$ | + | $5O_2$ | $\rightarrow$ | $4NO$ | + | $6H_2O$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| État initial | $x = 0$ | 100 | | excès | | 0 | | 0 |
| État intermédiaire | $x$ | $100 - 4x$ | | excès | | $4x$ | | $6x$ |
| État final | $x_f$ | $100 - 4x_f = 0$ | | excès | | $4x_f = 100$ | | $6x_f = 150$ |

*L'avancement et les quantités de matière sont exprimés en moles.*

**e.** $x_f = \dfrac{100}{4} = 25{,}0$ mol.

Quand le rapport $\dfrac{n(NH_3)}{n(NO)} = 19{,}0$,

alors $\dfrac{100 - 4x}{4x} = 19{,}0$ soit $100 - 4x = 76{,}0x$

d'où $x = \dfrac{100}{80{,}0} = 1{,}25$ mol.

**f.** Quand le rapport vaut 3,0, alors $\dfrac{100 - 4x}{4x} = 3{,}0$ soit $100 - 4x = 12{,}0x$, d'où $x = \dfrac{100}{16{,}0} = 6{,}25$ mol.

**g.** L'avancement est différent puisqu'il correspond à une durée de réaction différente. Le séjour dans le réacteur est le seul moment où la réaction avance significativement puisque, dès que le système chimique est sorti du réacteur, il n'est plus en contact avec le catalyseur.

*Remarques :*

• Lors de la synthèse, il reste des réactifs non consommés : c'est presque toujours le cas dans ce type de réacteur industriel qui fonctionne en continu. Il est prévu une étape de séparation avec recyclage des réactifs.

• À la question **e.**, 4 est un nombre entier (exact) puisque c'est un nombre stœchiométrique. Le nombre de chiffres significatifs est donc fixé par les valeurs en moles.

## Rédiger une synthèse de documents

### 21 Conservation et cuisson des aliments

**1.** *Analyse de la question*

La question indique que la synthèse demandée doit expliquer le lien entre la chimie et la conservation ou la cuisson des aliments, c'est-à-dire expliciter quels types de réactions sont mis en jeu. En jouant sur la température, facteur cinétique, il est possible d'écourter ces réactions ou au contraire d'augmenter leur durée.

**2.** *Pistes de réponses et mots-clés*

| But | **Conservation** des aliments | **Cuisson** des aliments |
|---|---|---|
| Réactions mises en jeu | **Réactions de dégradation** : à éviter. | **Réactions** permettant l'**attendrissement** des aliments (voir DOC. 2, dégradation du collagène) : à favoriser.<br>**Réactions de dégradation de certains arômes et colorants** (voir DOC. 2) : à éviter. |
| Température | **Basses** voire très basses pour **ralentir** voire **bloquer** ces réactions | • Si **hautes températures**, cuisson plus rapide car la durée des réactions permettant l'attendrissement est écourtée mais c'est également le cas pour la durée des réactions à éviter.<br>• Si **basses températures**, les réactions à éviter peuvent être si lentes qu'on ne les observe pas mais les réactions permettant la cuisson sont également plus lentes. |
| Solutions envisagées | • **Température ambiante** : réactions de l'ordre de un jour, durées de conservation courtes.<br>• **Réfrigérateurs** : réactions plus lentes, durées de conservation plus longues.<br>• **Congélateurs** : réactions quasi-bloquées, durées de conservation très longues. | • **Fours, friteuses** : à hautes températures à pression atmosphérique.<br>• **Autocuiseur** : à 110 voire 120 °C sous pression.<br>• **Appareils de cuisson à basse température et à basse pression**. |

Chapitre 12

# Représentation spatiale des molécules

## Introduction au chapitre (p. 302)

Ce chapitre, qui appartient au thème *Comprendre*, ouvre la partie de chimie organique de la classe de Terminale. Il introduit les représentations des molécules avant que ne soit étudiée la réactivité dans le chapitre suivant.

La représentation des molécules permet de rappeler les connaissances des classes antérieures sur les formules brutes semi-développées et développées. La représentation topologique est introduite et présentée comme un outil particulièrement adapté aux molécules organiques. La limite de ces représentations planes est à souligner ; le formalisme de Cram permet alors une première visualisation des molécules en trois dimensions.

L'apport d'une troisième dimension permet d'aborder la chiralité et la stéréochimie des molécules. Le programme envisage l'étude des stéréoisomères de conformation et de configuration qui était jusqu'alors abordée dans le cursus supérieur. Le cadre d'étude est toutefois restreint pour permettre une découverte des notions au niveau de la classe de Terminale.

Dans le cadre du programme de Terminale, les relations d'énantiomérie et de diastéréoisomérie sont amenées par trois éléments : un ou deux atomes de carbone asymétriques ou encore la présence d'une double liaison C═C. La notion d'atome de carbone asymétrique est ainsi introduite sans définir les configurations absolues R et S, qui restent hors programme. Les termes d'énantiomères, de diastéréoisomères et de mélange racémique sont introduits tout comme quelques-unes de leurs propriétés physico-chimiques. Le pouvoir rotatoire n'est pas introduit par le programme et n'est donc pas présenté. Les propriétés comparées des énantiomères purs et du mélange racémique (pouvoir rotatoire, température de fusion, etc.) ne sont pas discutées. Les propriétés des stéréoisomères de configuration sont donc principalement illustrées sur des exemples biologiques comme les médicaments et les parfums à travers les activités et les documents de la dernière page du chapitre.

Ce chapitre permet également d'aborder la notion de conformation. Cette notion est pertinente dans le cas des molécules présentant des rotations autour de simples liaisons. Seules des molécules relativement simples sont introduites dans cet ouvrage, les conformations des molécules cycliques ayant été jugées hors programme, de même que la terminologie associée aux différentes conformations. L'élève est amené à pouvoir trouver la conformation la plus stable d'une molécule en envisageant les rotations possibles autour d'une liaison simple C—C. Une première approche de la quantification de la stabilité d'une conformation est introduite grâce à l'énergie potentielle de conformation. La projection de Newman, particulièrement bien adaptée pour l'étude des conformations, ne figure pas au programme. Toutefois, à travers l'activité 4, la visualisation selon l'axe de la liaison considérée est introduite comme outil de représentation dans l'espace pour mieux juger la distance entre différents atomes et groupes d'atomes. L'importance des conformations en milieu biologique est illustrée par l'étude de la reconnaissance des protéines.

## Activités

### 1 Comment représenter les espèces chirales ? (p. 304)

***Objectif***

Cette activité permet aux élèves de s'exercer à représenter des molécules dans l'espace. À partir d'une formule semi-développée, plane, l'élève utilise les conventions de Cram pour introduire la vision dans l'espace. Il est ensuite amené à identifier les atomes de carbone asymétriques et à déterminer si la molécule est chirale, ce qui nécessite une capacité à manipuler des objets tridimensionnels par la pensée. La molécule choisie est volontairement simple pour permettre une visualisation mentale, mais le recours, dans un premier temps, à un modèle moléculaire peut s'avérer très utile.

***Correspondance avec le programme***

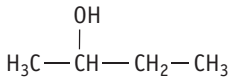
• Reconnaître des espèces chirales à partir de leur représentation.

• Utiliser la représentation de Cram.

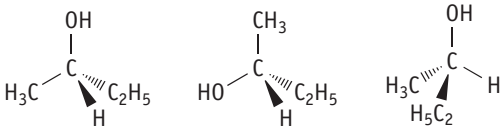
• Identifier les atomes de carbone asymétriques d'une molécule donnée.

***Corrigé***

**a.** Le butan-2-ol :



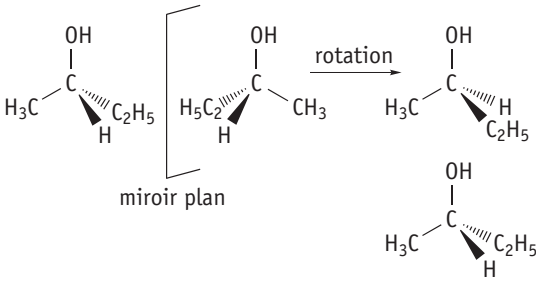
**b.** Plusieurs réponses sont possibles, des exemples sont donnés ci–dessous :



**c.** L'atome de carbone n° 2 est entouré de quatre atomes ou groupes d'atomes différents (—H, —OH, $—C_2H_5$, $—CH_3$), il est donc asymétrique.

**d.** Les atomes de carbone reliés à au moins deux atomes d'hydrogène ne sont pas entourés de quatre atomes ou groupes d'atomes différents ; ils ne sont donc pas asymétriques. Le butan-2-ol ne possède donc pas d'autre atome de carbone asymétrique.

**e.** À partir d'une représentation de Cram du butan-2-ol, il faut représenter son image par un miroir, faire une rotation globale de la molécule et constater que les molécules ne sont pas superposables. Il est alors possible d'en déduire que le butan-2-ol est une molécule chirale, ce qui est cohérent avec le fait qu'il possède un unique atome de carbone asymétrique.




*Remarque* : il est possible de faire remarquer que l'on a représenté deux énantiomères.

***Commentaires***

Des astuces peuvent être données pour simplifier les questions récurrentes :

• pour la recherche d'atomes de carbone asymétriques, la prise de conscience que les atomes entourés de deux atomes d'hydrogène ou plus ne sont pas asymétriques permet un gain de temps considérable ;

• pour identifier les molécules chirales, le critère donné dans le cours, disant qu'une molécule présentant un unique atome de carbone asymétrique est chirale, permet également un grand gain de temps.

## 2 Comment déterminer des relations de stéréoisomérie ?

**(p. 305)**

***Objectif***

Cette activité entraîne l'élève à travailler avec une molécule possédant deux atomes de carbone asymétriques, dans un premier temps à l'aide d'un modèle moléculaire, puis sans ce support. Il doit ainsi adopter une approche systématique de la détermination des relations de stéréoisomérie de configuration (en suivant, par exemple, le cheminement adéquat donné dans l'essentiel), l'étude des stéréoisomères de conformation étant abordée dans l'activité 4.

Le terme de *stéréoisomères de configuration* reste, bien sûr, en dehors de la portée du programme.

Le but est ainsi de passer du modèle que l'élève a dans les mains à une représentation plus abstraite à l'aide des conventions de Cram.

***Correspondance avec le programme***

• À partir d'un modèle moléculaire ou d'une représentation, reconnaître si des molécules sont identiques, énantiomères ou diastéréoisomères.

• Utiliser la représentation topologique des molécules organiques.

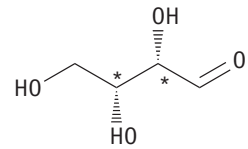
• Reconnaître des espèces chirales à partir de leur représentation.

• Utiliser la représentation de Cram.

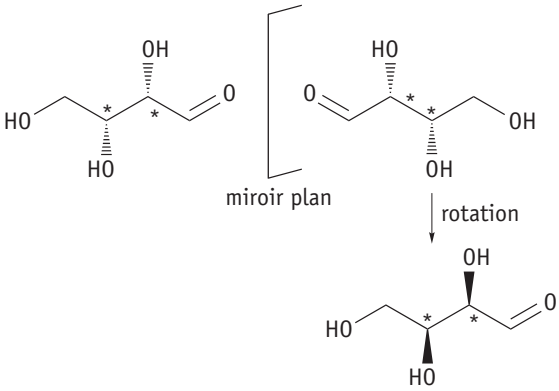
• Identifier les atomes de carbone asymétriques d'une molécule donnée.

***Corrigé***

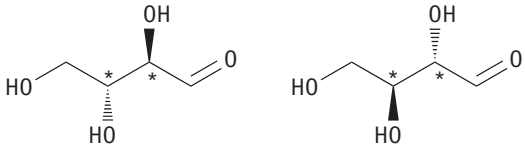
**a.** En identifiant les atomes reliés à quatre groupes d'atomes différents, il est possible de repérer à l'aide d'un astérisque les deux atomes de carbone asymétriques de cette molécule.



**b.** En faisant l'image par un miroir plan du thréose, on obtient son énantiomère. La construction des deux énantiomères à l'aide d'un modèle moléculaire permet de s'assurer que les deux molécules ne sont pas superposables.

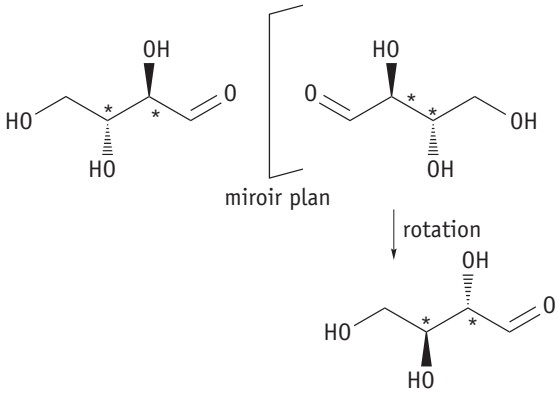



**c.** Plusieurs représentations sont possibles, car deux énantiomères peuvent être obtenus selon le carbone asymétrique qui a été modifié :

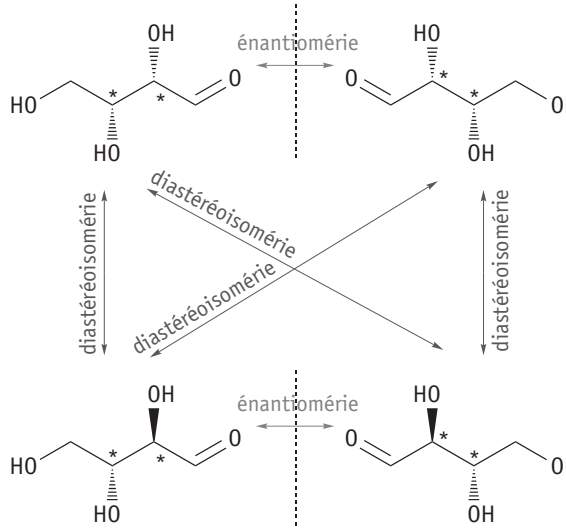



**d.** Il s'agit de diastéréoisomères car, bien que possédant la même formule semi-développée, ils ne sont pas images l'un de l'autre par un miroir.

**e.** Pour obtenir l'énantiomère de la molécule, il suffit de représenter l'image par un miroir de la molécule d'érythrose choisie et de s'assurer que la molécule et son image ne sont pas superposables. La molécule possède donc un énantiomère.




**f.** Les relations entre composés sont données dans le schéma ci-après. Il est possible de souligner que si une molécule A a une relation de diastéréoisomérie avec une molécule B, alors l'énantiomère de A aura une relation de diastéréoisomérie avec B. De même pour l'énantiomère de B qui sera donc diastéréoisomère de A.




***Commentaires***

• Il faut familiariser les élèves avec les représentations de Cram où l'atome d'hydrogène est éludé par soucis de simplification. L'élève doit pouvoir déduire rapidement la position dans l'espace de l'hydrogène non représenté (par exemple, si autour d'un atome de carbone, deux liaisons sont dans le plan et une troisième est vers l'arrière, la quatrième liaison, celle avec l'atome d'hydrogène, est forcément vers l'avant).

• Il est également possible d'insister un peu plus sur une approche très intuitive des configurations absolues R et S, sans bien sûr utiliser cette nomenclature, afin de faire passer l'idée qu'en modifiant l'agencement des quatre atomes ou groupes d'atomes entourant l'atome de carbone, il est possible d'obtenir différents diastéréoisomères.

• Pour la question **f.** la chimie des sucres utilise traditionnellement les conventions de Fischer pour représenter la différence entre les stéréoisomères. La nomenclature L et D en est issue (par exemple, le D-glucose et le L-glucose). Les conventions de Fischer sont parfois également utilisées pour représenter les acides aminés. Par ailleurs l'érythrose et le thréose ont donné leur nom aux deux combinaisons possibles de configurations absolues sur des atomes de carbone asymétriques voisins : le couple érythro/thréo.

## 3 Propriétés des acides fumarique et maléique (p. 306)

### *Objectif*

Cette séance de travaux pratiques s'intéresse aux différences de propriétés entre deux composés de même formule semi-développée.

Il s'agit d'illustrer les différences de propriétés physiques (point de fusion, rapport frontal en CCM, solubilité) des diastéréoisomères.

Ce TP est aussi l'occasion de faire un lien avec le chapitre de spectroscopie à travers l'interprétation des spectres des produits utilisés.

### *Correspondance avec le programme*

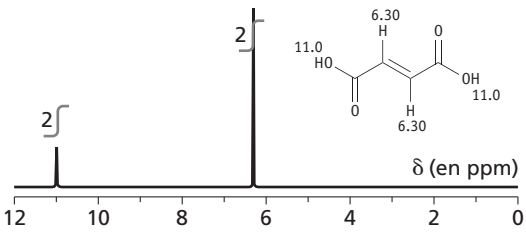
Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence des propriétés différentes de diastéréoisomères.

### *Liste du matériel*

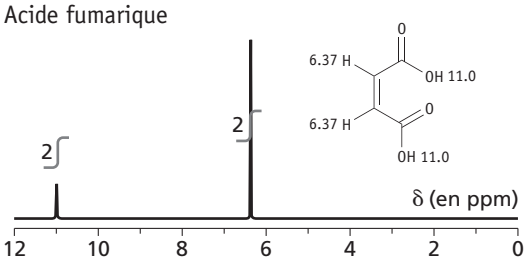
- Acide fumarique (irritant) et acide maléique (nocif).
- Eau distillée.
- Solution d'acide maléique à 1 % dans l'éther diéthylique.
- Solution d'acide fumarique à 1 % dans l'éther diéthylique.
- Éthanol.
- Banc Köfler, ou tube de Thiele.
- Plaque CCM, cuve, lampe UV et lunettes de protection.

### *Spectres RMN à fournir aux élèves*

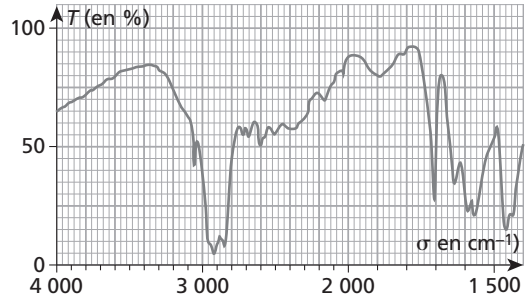
Acide maléique



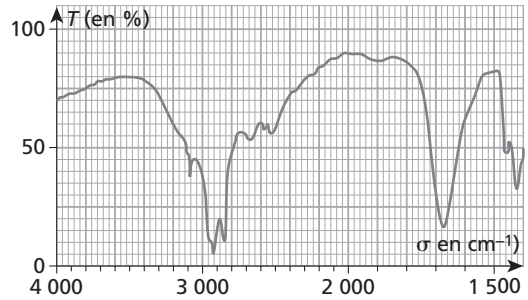

Acide fumarique




Acide maléique



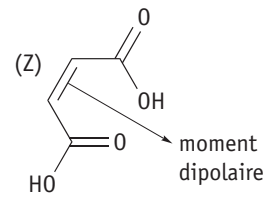

Acide fumarique




### *Corrigé*

**a.** Les deux acides sont des poudres blanches.

**b.** L'acide fumarique se sublime à 200 °C (passage de solide à gaz sans passer par l'intermédiaire liquide). La température de fusion de l'acide maléique est 131 °C.

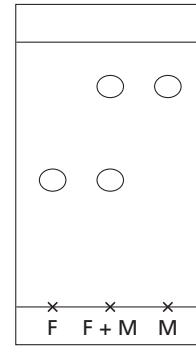



**c.** L'acide maléique est plus soluble (sa solubilité dans l'eau à 25 °C est de 780 $g.L^{-1}$) que l'acide fumarique (sa solubilité dans l'eau à 25 °C est de 6,3 $g.L^{-1}$).

L'eau, qui est un solvant polaire, est un bon solvant pour les molécules polaires comme l'acide maléique, et un moins bon solvant pour les molécules ne possédant pas de moment dipolaire, comme l'acide fumarique.

**d.** L'allure d'une plaque CCM après révélation est donnée ci-contre.

L'acide maléique (M) migre plus vite que l'acide fumarique (F).



**e.** Les spectres IR et RMN des deux diastéréoisomères sont proches. Ils présentent quelques différences : les valeurs de la vibration de C═O dans le spectre IR et les valeurs des déplacements chimiques en RMN.

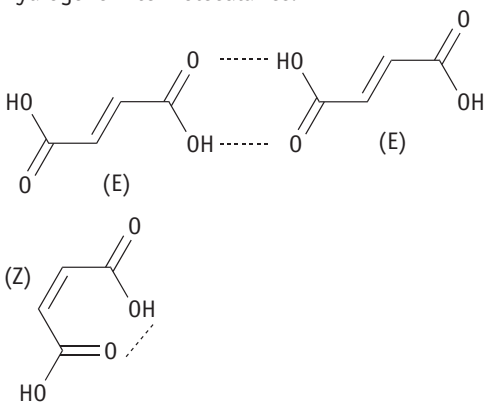
**f.** Il s'agit de faire retrouver les vibrations caractéristiques des acides carboxyliques (liaison O—H à 2 900 $cm^{-1}$, liaisons C═O à 1 670 $cm^{-1}$) et de l'alcène (déplacement à 6 ppm dû à la présence des deux COOH, en revanche la liaison C═C est moins visible en IR).

***Commentaires***

• Pour la question **b.** au-delà de 130 °C, l'acide maléique se déshydrate en anhydride maléique. La stéréochimie E de l'acide fumarique ne permet pas son passage à l'anhydride.

• Il est souhaitable de prévenir les élèves que l'acide fumarique ne possède pas de point de fusion, mais un point de sublimation. L'acide fumarique étant irritant pour les yeux, on ne le place pas sur le banc Köfler.

• Les différentes températures de fusion à l'aide des liaisons hydrogènes s'expliquent ainsi : les acides carboxyliques ont tendance à former des liaisons hydrogène intermoléculaires.




L'acide fumarique se lie aux molécules voisines par ses deux groupes acide carboxylique ; il est donc beaucoup plus associé aux autres molécules que l'acide maléique, qui a tendance à établir des liaisons intramoléculaires. L'acide fumarique possède, pour cette raison, une température de fusion plus élevée.

• Pour la question **e.** dans l'acide maléique, les groupements encombrants sont du même côté de la double liaison, ce qui engendre une géométrie pas entièrement plane. La conjugaison entre les groupes est amoindrie, donc la bande résonne à une plus haute fréquence (double liaison C═O : acide maléique 1 720 $cm^{-1}$ et acide fumarique 1 680 $cm^{-1}$).

• Pour la question **f.** d'autres propriétés (dues aux liaisons hydrogène) : des différences dans les acidités des groupes carboxyliques données dans le tableau suivant.

| Molécule | $pKa_1$ Première acidité | $pKa_2$ Deuxième acidité |
|---|---|---|
| Acide fumarique (E) | 3,03 | 4,04 |
| Acide maléique (Z) | 1,83 | 6,59 |

L'acide fumarique est présent dans la plupart des fruits et dans de nombreux légumes. On le retrouve dans le domaine alimentaire comme acide et stabilisant (E297).

Un article paru dans le *Journal of Chemical Education* traite simplement de l'isomérisation photochimique de l'acide fumarique vers l'acide maléique. Cette manipulation suivie par CCM peut être envisagée en TP ou en exercice.

Albert J. Castro, Suzanne R. Ellenberger and James P. Sluka, *J. Chem. Educ.*, 1983, 60 (6), p. 521.

## 4 Différentes conformations d'une molécule (p. 307)

***Objectif***

Cette activité s'intéresse aux stéréoisomères de conformation. À l'aide d'un logiciel de visualisation et d'un modèle moléculaire, les élèves doivent tout d'abord se convaincre de la possibilité de la rotation autour d'une liaison simple, puis se familiariser avec la notion intuitive d'encombrement stérique, pour identifier les conformations où la gêne stérique est moindre (conformation la plus stable) et celle où elle est importante (conformation la plus instable). Cette activité propose également de quantifier cette notion de « stabilité » en ayant recours à une énergie potentielle conformationnelle (ou de conformation).

***Correspondance avec le programme***

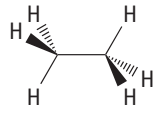
Visualiser, à partir d'un modèle moléculaire et d'un logiciel de simulation, les différentes conformations d'une molécule.

***Liste du matériel***

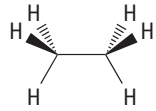
Un kit de modèle moléculaire et un ordinateur par élève/groupe d'élèves.

***Corrigé***

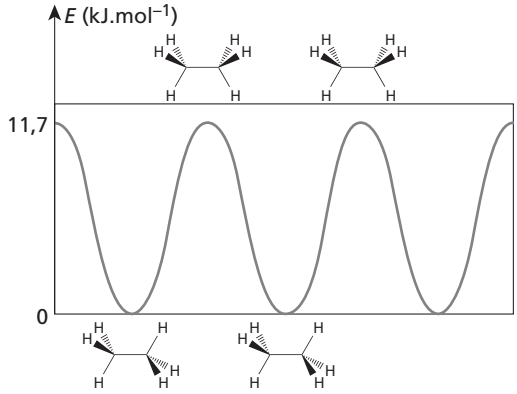
**a.** Représentation de Cram des conformations où les atomes d'hydrogène sont le plus éloignés les uns des autres (aussi appelée décalée) :



Représentation de Cram de la conformation où les atomes d'hydrogène sont en vis-à-vis (aussi appelée éclipsée) :

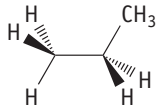


**b.** Courbe d'énergie potentielle de conformation :

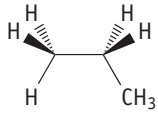



Travail pour le propane :

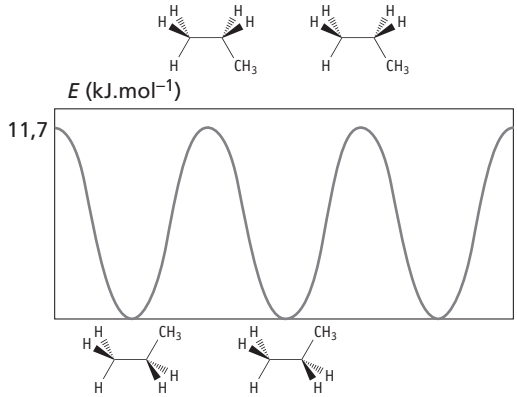
• conformation la plus stable :



• conformation la plus instable :



• courbe d'énergie potentielle de conformation :




***Commentaire***

Il nous paraît intéressant d'encourager les élèves à regarder selon l'axe de la liaison étudiée, utilisant ainsi, sans le dire, la projection de Newman, particulièrement adaptée à l'étude des différentes conformations. D'autres molécules peuvent être étudiées (exemples dans les exercices : éthanol, etc.). Pour avoir un diagramme d'énergie qui fait intervenir des positions en plus de la conformation la plus et la moins stable, il est possible de s'intéresser à la molécule de butane (le diagramme énergétique est représenté dans la plupart des ouvrages de PCSI).

## 5 Importance de la stéréochimie des molécules thérapeutiques (p. 308)

***Objectif***

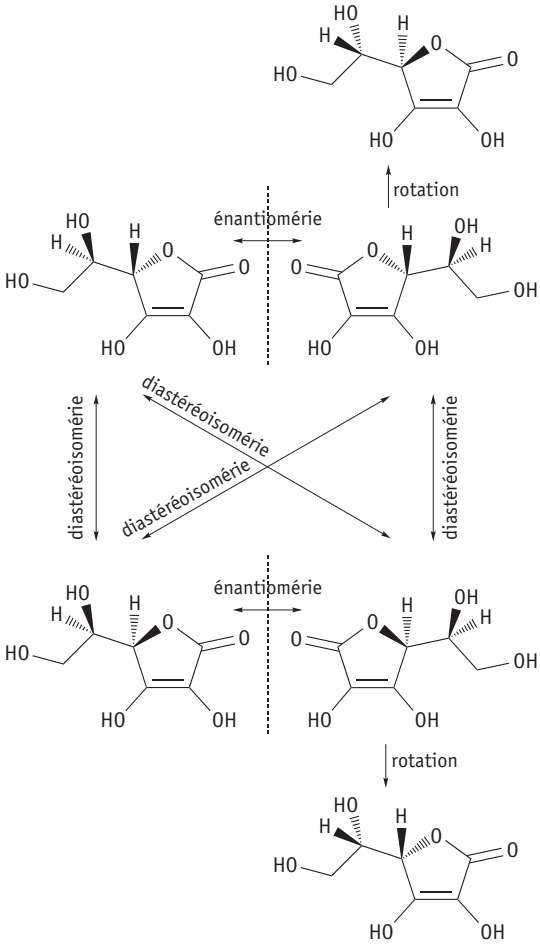
Cette activité se base sur des compétences acquises au cours du chapitre, à savoir la détermination des relations de stéréoisomérie et l'identification des atomes de carbone asymétriques dans le cas d'un composé cyclique, pour amener à réfléchir sur l'importance des propriétés différentes des énantiomères en milieu biologique. L'activité est essentiellement centrée sur l'étude des propriétés d'un couple d'énantiomères. L'élève est amené à identifier des relations d'énantiomérie entre des molécules ayant une activité thérapeutique et à réfléchir aux conséquences de leur activité sur leur utilisation. Cette étude permet d'illustrer les différences de propriétés des énantiomères dans un environnement chiral, ici un organisme vivant. Cette notion vient contrebalancer le fait que les propriétés usuellement mentionnées (solubilité, point de fusion, etc.) sont identiques pour un couple d'énantiomères. À travers certaines conséquences marquantes, l'élève réalise aussi l'importance de la stéréochimie en chimie.

***Correspondance avec le programme***

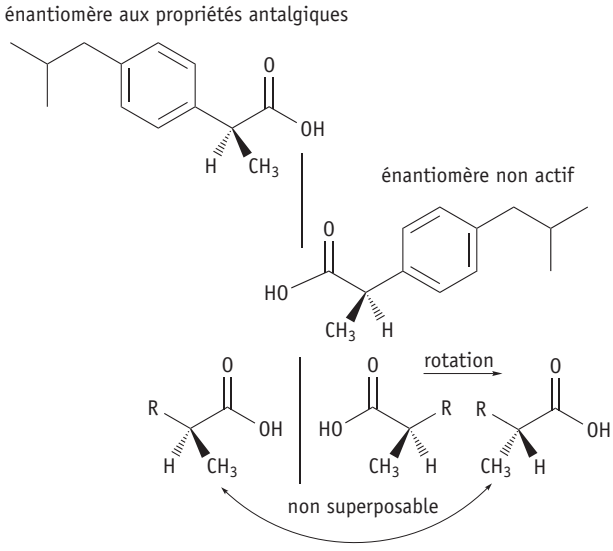
Extraire et exploiter des informations sur les propriétés biologiques de stéréoisomères pour mettre en évidence l'importance de la stéréoisomérie dans la nature.

***Corrigé***

**a.** L'acide ascorbique possède des diastéréoisomères (il s'agit d'une molécule comportant deux atomes de carbone asymétriques ; il y a donc deux couples d'énantiomères, diastéréoisomères entre eux).
Des diastéréoisomères possèdent des propriétés différentes ; on peut donc s'attendre à une activité différente sur le plan thérapeutique.




**b.** Il faut vérifier que les molécules sont images l'une de l'autre dans un miroir plan et ne sont pas superposables.




Ici l'un des énantiomères n'est pas actif, il est donc possible de commercialiser un mélange des deux énantiomères pour diminuer le coût de leur séparation. Seul l'énantiomère actif aura un intérêt thérapeutique, l'autre fera partie de l'excipient, il ne présente pas de danger pour la santé du patient qui le consomme.

**c.** Le scandale de 1962 a éclaté à cause de l'apparition de malformations chez les enfants dont les mères s'étaient vu administrer le thalidomide pendant leur grossesse. Ce médicament était prescrit comme sédatif, ce qui correspond à l'activité de l'un des énantiomères. Cependant, le thalidomide ayant été commercialisé sous forme de mélange racémique, les patientes ont aussi reçu le second énantiomère à l'activité nettement plus néfaste.

**d.** Un mélange racémique peut être utilisé lorsque l'un des énantiomères n'a pas d'activité ou une activité identique mais moins puissante ou encore une activité complémentaire à celle de l'autre énantiomère. Lorsque les énantiomères ont des activités contradictoires, ou lorsque l'un des énantiomères est toxique, les deux énantiomères doivent être séparés avant d'être utilisés dans la formulation du médicament.

***Commentaires***

• Pour aller plus loin, il est également possible d'étudier l'activité thérapeutique de différents diastéréoisomères Z/E ou de stéréoisomères de molécules comportant deux atomes de carbone asymétriques.

• Pour la question **b.** quand un fragment d'une molécule est remplacé par R, il faut s'assurer qu'il ne possède pas d'atome de carbone asymétrique avant d'entreprendre l'étude de l'image de la molécule par un miroir.

• L'activité biologique ne se limite pas à l'activité thérapeutique : l'usage peut en être fait comme pesticide, par exemple.

## 6 Conformations et propriétés biologiques (p. 309)

***Objectif***

Après avoir étudié, dans l'activité précédente, les propriétés des stéréoisomères de configuration, en particulier celles des énantiomères, cette activité approfondit la notion de stéréoisomères de conformation abordée lors de l'activité 4. Grâce à l'étude des documents, l'élève doit appréhender une protéine comme une chaîne flexible.

Il doit ensuite faire le lien entre la conformation de la protéine et sa capacité à remplir son rôle biologique avec un modèle très sommaire de la complémentarité « clé-serrure ». Il peut alors comprendre que certaines pathologies sont causées par une mauvaise conformation de la protéine.

### *Correspondance avec le programme*

Extraire et exploiter des informations sur les conformations de molécules biologiques pour mettre en évidence l'importance de la stéréoisomérie dans la nature.

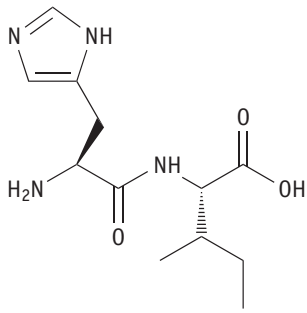
### *Corrigé*

**a.** La protéine PFK1 a une masse molaire $M_{PFK1}$ de 34 kg.mol$^{-1}$, tandis qu'un acide aminé a une masse $M_{aa}$ de 100 g.mol$^{-1}$. Le nombre d'acides aminés que contient la protéine est donc d'environ : $N = \frac{M_{PFK1}}{M_{aa}}$.

$N = \frac{34\,000}{100} = 340$ acides aminés (le nombre exact d'acides aminés est 320).

**b.** L'espèce chimique de la **figure 10** p. 309 est obtenue à partir de la L-Histidine et de la L-Isoleucine (voir la **figure 9** du manuel élève p. 309).

**c.**




**d.** Au sein de chaque acide aminé, de nombreuses conformations sont possibles car de nombreuses liaisons simples sont présentes. Le nombre de conformations d'une protéine augmente naturellement avec le nombre d'acides aminés de cette dernière.

**e.** Si la protéine, qui joue le rôle de serrure, n'adopte pas la bonne conformation, elle ne pourra pas reconnaître la clé, car il n'y aura plus complémentarité. Dans le cas de la protéine PFK1, la transformation du fructose-1-phosphate en fructose-1,6-diphosphate ne pourrait avoir lieu. La métaphore clé-serrure a bien évidemment des limites, mais elle a pour mérite de souligner l'importance de la structure tridimensionnelle d'une protéine.

### *Commentaire*

Pour la question **d.** deux structures rigides se retrouvent d'une protéine à l'autre : les hélices alpha et des feuillets bêta. Elles se maintiennent parce que l'établissement de liaisons hydrogène rigidifie la molécule, tandis que d'autres parties de la protéine sont beaucoup plus mobiles.

## Exercices

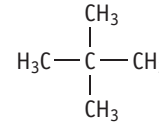
## Applications

### 1 Représenter un alcool

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, page 638.*

### 2 Représenter un alcane substitué

**a.** Le 2,2-diméthylpropane possède une chaîne carbonée de 3 atomes de carbone et deux groupes —$CH_3$ sur le deuxième atome de carbone.




**b.** Pour obtenir la formule topologique, il faut éluder les atomes de carbone et les atomes d'hydrogène liés, et représenter la chaîne carbonée par une ligne brisée ( ).

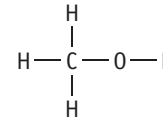
Il faut ensuite ajouter les ramifications :

### 3 Représentation tridimensionnelle autour d'un atome de carbone

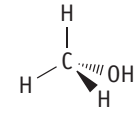
*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 4 Représentation tridimensionnelle

**a.** Le méthanol possède un unique atome de carbone, entouré de trois atomes d'hydrogène et d'un groupe hydroxyde ; sa formule développée est donnée ci-contre.

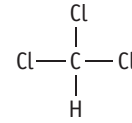



L'atome de carbone est dans un environnement tétraédrique, deux liaisons C—H sont dans le plan, une liaison C—H est vers l'avant (en gras) et une quatrième liaison, C—OH, est vers l'arrière (en pointillés).

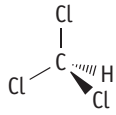



**b.** Le chloroforme possède un unique atome de carbone, entouré de trois atomes de chlore et d'un atome d'hydrogène.

Sa formule développée est donnée ci-contre.

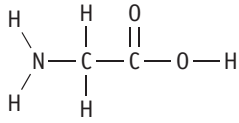


L'atome de carbone est dans un environnement tétraédrique, deux liaisons C—Cl sont dans le plan, une liaison C—Cl est vers l'avant (en gras) et une quatrième liaison, C—H, est vers l'arrière (en pointillés).

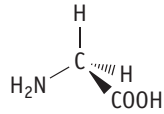


### 5 Représentation d'un acide α-aminé

La formule développée de la glycine est :



Seul un des atomes de carbone est entouré par quatre groupes et peut donc faire l'objet d'une représentation de Cram.



### 6 Recherche d'un atome de carbone asymétrique

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 7 Autour d'un atome de carbone asymétrique

**a.** L'atome de carbone n° 1 est entouré par trois atomes d'hydrogène et un groupe ($CHOH—CH_3$). Il n'est donc pas asymétrique.

**b.** L'atome de carbone n° 2 est entouré par un groupe —OH, un atome d'hydrogène, et deux groupes $—CH_3$. Il n'est donc pas asymétrique.
L'atome de carbone n° 3 est semblable à l'atome de carbone n° 1. Il n'est donc pas asymétrique.

**c.** La molécule est donc achirale.

### 8 Trouver un atome de carbone asymétrique

**a.** L'atome de carbone n° 1 est entouré par trois atomes d'hydrogène et un groupe ($CHOH—CH_2—CH_2—CH_3$). Il n'est donc pas asymétrique.

**b.** L'atome de carbone n° 2 est entouré par un atome d'hydrogène, un groupe —OH, un groupe $—CH_3$ et un groupe $—CH_2—CH_2—CH_3$.
Les quatre groupes sont différents, l'atome de carbone n° 2 est donc asymétrique.
L'atome de carbone n° 3 est entouré par deux atomes d'hydrogène, un groupe $—CH_2—CH_3$ et un groupe $—CHOH—CH_3$.
Il n'est donc pas asymétrique.
L'atome de carbone n° 4 est entouré par deux atomes d'hydrogène, un groupe $—CH_3$ et un groupe $—CH_2—CHOH—CH_3$.
Il n'est donc pas asymétrique.
L'atome de carbone n° 5 est entouré par trois atomes d'hydrogène et un groupe $—CH_2—CH_2—CHOH—CH_3$.
Il n'est donc pas asymétrique.

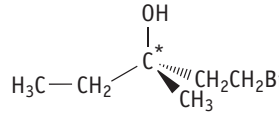
**c.** La molécule possède un unique atome de carbone asymétrique, elle est donc chirale.

### 9 Recherche de la chiralité

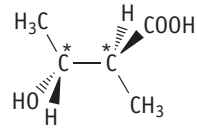
*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 10 Identification de molécules chirales

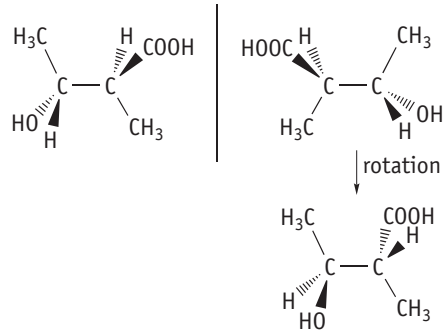
**a.** La molécule de gauche possède un unique atome de carbone asymétrique, indiqué avec un astérisque, elle est donc chirale (les autres atomes de carbone sont entourés d'au moins deux atomes d'hydrogène, ils ne donc pas asymétriques) :



La molécule de droite possède deux atomes de carbone asymétriques, indiqués avec des astérisques :



Elle n'est pas superposable à son image par un miroir plan, elle est donc chirale.

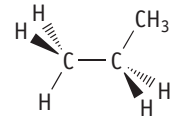



### 11 Conformations de l'éthane

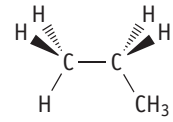
*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 12 Conformations du propane

**a.** Une formule spatiale possible avec les conventions de Cram :



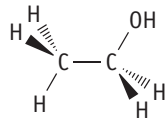
**b.** Une autre formule spatiale possible est :



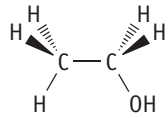
**c.** Ici tous les substituants d'un des deux atomes de carbone sont des atomes d'hydrogène ; l'autre est entouré d'un groupe méthyle et de deux atomes d'hydrogène. La conformation la plus stable est celle où les atomes d'hydrogène du premier atome de carbone sont le plus éloignés du groupe méthyle du second, c'est-à-dire celle représentée en **a.**

### 13 Conformations de l'éthanol

**a.** Une formule spatiale possible avec les conventions de Cram :



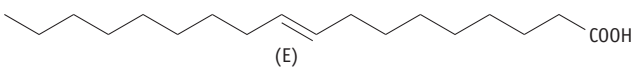
**b.** Une autre formule spatiale possible est :

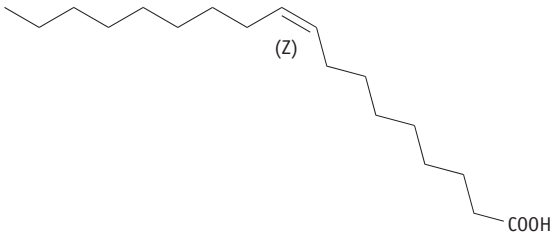


**c.** Ici tous les substituants d'un des deux atomes de carbone sont des atomes d'hydrogène ; l'autre est entouré d'un groupe —OH et de deux atomes d'hydrogène. La conformation la plus stable est celle où les atomes d'hydrogène du premier atome de carbone sont le plus éloignés du groupe —OH du second, c'est-à-dire celle représentée en **a.**

### 14 L'acide oléique

**a.** Formule topologique des alcènes Z et E :




**b.** Des alcènes Z et E, s'ils existent, sont diastéréoisomères (ils ont même formule semi-développée, ce ne sont pas deux conformations de la même molécule car il n'y a pas rotation libre autour de la liaison C=C et ils ne sont pas images l'un de l'autre par un miroir plan).

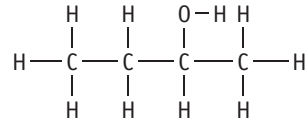
### 15 Relations d'isomérie

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

## Entraînement

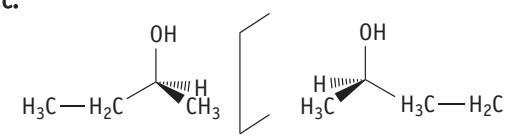
### 16 Cas d'un carbone asymétrique

**a.** Formule développée :



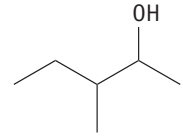
**b.** Cette molécule possède un unique atome de carbone asymétrique, elle est donc chirale.

**c.**

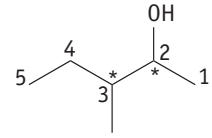


### 17 Cas de deux atomes de carbone asymétriques

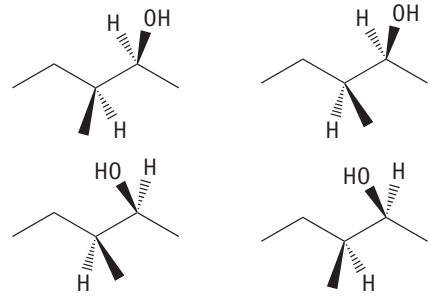
**a.** Formule topologique :



**b.** L'atome de carbone n° 3 est lié à quatre groupes d'atomes différents :
($—CH_2—CH_3$, $—CH_3$, $—CH(OH)CH_3$, —H)
et l'atome de carbone n° 2 également
($—CH(CH_3)CH_2CH_3$, —OH, $—CH_3$, —H).
Ces deux atomes de carbone sont asymétriques.

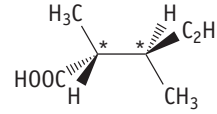


**c.** Isomères possibles :

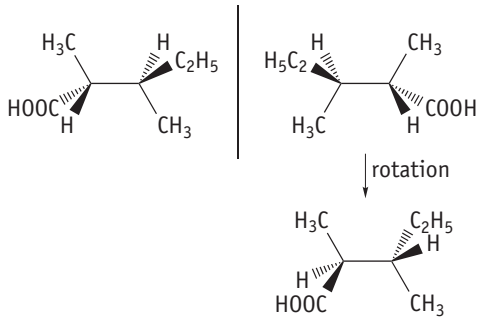


### 18 Relation d'isomérie

**a.** La molécule possède deux atomes de carbone asymétriques.

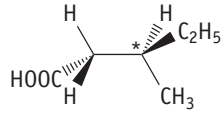


**b.** Les deux molécules possèdent la même formule semi-développée, ne sont pas reliées par des simples rotations autour de liaisons mais ne sont pas non plus images l'une de l'autre par un miroir. Il s'agit donc de diastéréoisomères.

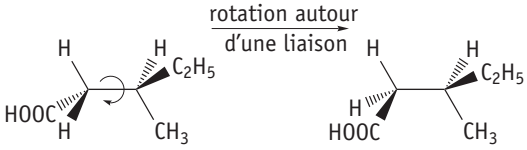



## 19 Recherche d'isomères

**a.** La molécule possède un atome de carbone asymétrique.




**b.** Il s'agit de conformations d'une même molécule.




## 20 Étude de stéréoisomères du 2-bromo,3-chloro, 3-méthylpentan-2-ol

**a.** Diastéréoisomères.

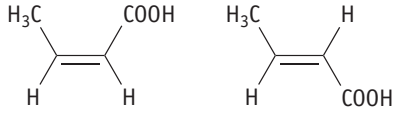
**b.** Énantiomères.

**c.** Conformations de la même molécule.

**d.** Conformations de la même molécule.

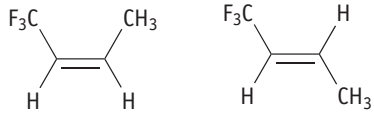
## 21 Diastéréoisomères d'alcènes

**a.** Isomère Z : Isomère E :




**b.** Pas de diastéréoisomérie (l'un des atomes impliqués dans la double liaison carbone-carbone porte deux atomes d'hydrogène ; il n'y a donc pas de configuration Z et E).

**c.** Isomère Z : Isomère E :

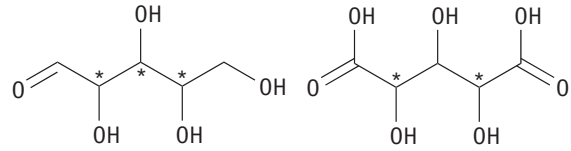



**d.** Pas de diastéréoisomérie (même justification que pour **b.** : le cycle étant symétrique, les deux groupements portés par l'atome de carbone sont les mêmes).

## 22 Isomères de glucides

**a.** et **b.** Formules topologiques et identification des atomes de carbone asymétriques :

Molécule A Molécule B




**c.** La molécule 1 est achirale, elle ne peut donc pas posséder d'énantiomères :

- les molécules 2,4 et 5 sont des diastéréoisomères de 1 ;
- les molécules 1 et 3 sont identiques.

La molécule 2 est chirale, son énantiomère est la molécule 5. Elle a une relation de diastéréoisomérie avec les autres molécules.

La molécule 4 est achirale, elle a une relation de diastéréoisomérie avec les autres molécules.

Comme vu précédemment, la molécule 5 est l'énantiomère de la molécule 2. Elle a des relations de diastéréoisomérie avec les autres molécules.

## 23 Mélanges racémiques

**a.** Un mélange équimolaire d'énantiomères (voir cours p. 314 du manuel de l'élève).

**b.** La molécule 3 est identique à la molécule 1 et la molécule 2 est son énantiomère (image par un miroir). Il faut donc ajouter une solution de 2.

**c.** Il faut ajouter la même quantité de matière de 2 ($n$) que l'on a de 1 ($n_1$) en solution :

$n = n_1 = c\ V$, avec $c$ la concentration de la solution de 1.

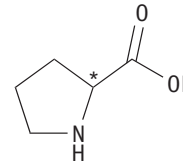
$n = 0{,}025 \times 20{,}0.10^{-3} = 0{,}50.10^{-3}$ mol

d'où, avec $M$ la masse molaire des énantiomères de formule brute $C_4H_{10}O$ :

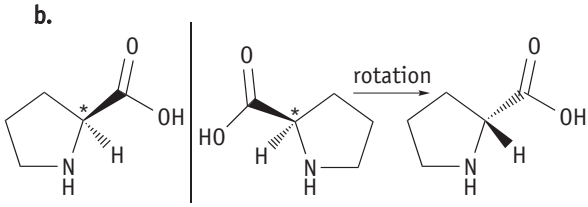
$m = n\ M = 0{,}50.10^{-3} \times 74 = 37.10^{-3}$ g.

## 24 Étude d'un acide aminé

**a.** La proline possède un unique atome de carbone asymétrique car les autres atomes de carbone reliés à quatre atomes sont reliés à deux atomes d'hydrogène. La proline est donc chirale et possède deux énantiomères.



**b.**

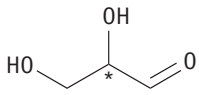



énantiomère 1 énantiomère 2

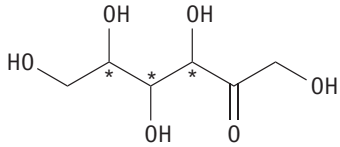
**c.** Il s'agit d'un mélange racémique.

## 25 Les glucides

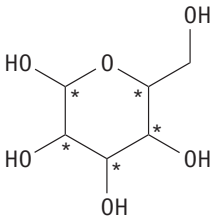
• Le glycéraldéhyde :



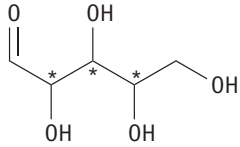
• Le fructose :



• Le glucose :



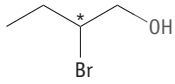
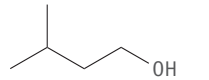
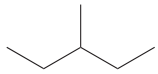
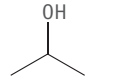
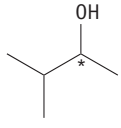
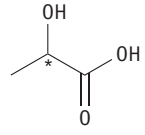
• L'arabinose :



## 26 Un atome de carbone asymétrique

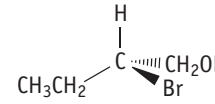
**a.** Un atome de carbone asymétrique est lié à quatre atomes ou groupes d'atomes différents.

**b.** Les atomes de carbone liés à deux ou trois atomes d'hydrogène ne sont pas asymétriques.

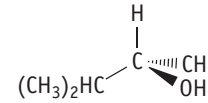
| | |
|---|---|
| 2 bromobutan-1-ol :  $R_1$ = —$CH_2$—$CH_3$ ; $R_2$ = Br ; $R_3$ = H ; $R_4$ = —$CH_2$—OH | 3 méthylbutan-1-ol :  aucun atome asymétrique |
| 3 méthylpentane :  aucun atome asymétrique | Propan-2-ol :  aucun atome asymétrique |
| 3 méthylbutan-2-ol :  $R_1$ = —$CH(CH_3)_2$ ; $R_2$ = —$CH_3$ ; $R_3$ = H ; $R_4$ = —OH | Acide lactique :  $R_1$ = —COOH ; $R_2$ = —$CH_3$ ; $R_3$ = H ; $R_4$ = —OH |

Dans ce tableau, la notation R est adoptée pour préciser la nature des substituants.

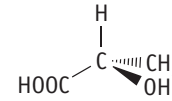
**c.** 2 bromobutan-1-ol :



3 méthylbutan-2-ol :

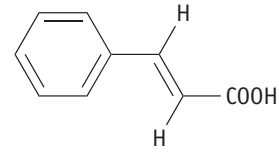


Acide lactique :

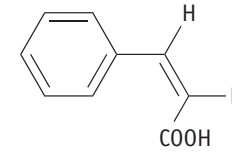


## 27 Identification de la chiralité

**a.** Molécule non chirale, mais il existe deux diastéréoisomères.

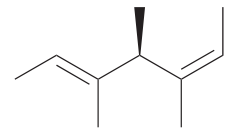


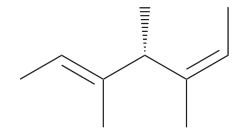
E



Z

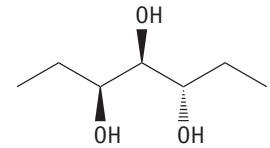
**b.** Molécule chirale, car non superposable à son image dans un miroir. Des diastéréoisomères sont obtenus en modifiant la configuration d'une double liaison carbone-carbone.





énantiomère

**c.** Molécule non chirale, car superposable à son image dans un miroir.

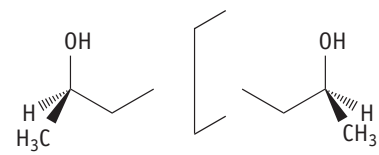


## 28 Autour d'un alcool

**a.** HO—$CH_2$—$CH_2$—$CH_3$ ; $CH_3$—CH(OH)—$CH_2$—$CH_3$ ; HO—$CH_2$—$CH(CH_3)$—$CH_3$ ; $(CH_3)_3COH$.

**b.** $CH_3$—C*H(OH)—$CH_2$—$CH_3$

**c. et d.** La molécule est chirale.

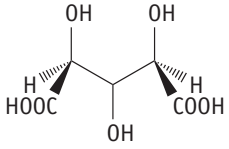


### 29 Étude d'un diacide

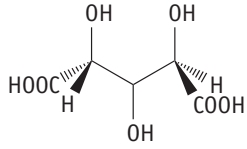
**a.** HOOC—C*H(OH)—CH(OH)—C*H(OH)—COOH, l'atome de carbone central n'est pas asymétrique car il est substitué deux fois par le même groupe d'atomes HOOC—CH(OH)—.

*Remarque* : le cours ne distingue pas les substituants constitués des mêmes atomes mais avec des configurations absolues différentes. Or, les règles de Cahn, Ingold et Prelog qui s'appliquent, attribuent un poids plus important à une configuration R qu'à une configuration S. En toute rigueur, l'atome de carbone central peut donc dans certains cas (lorsque les configurations absolues des atomes de carbone adjacents sont différentes) être asymétrique.

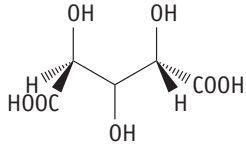
**b.** Les trois stéréoisomères sont :



(i)



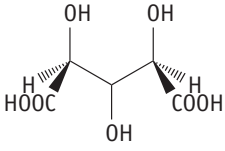
(ii)



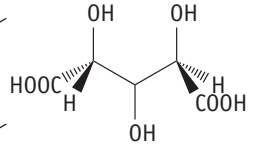
(iii)

*Remarque* : si l'on tient compte de la remarque précédente, l'atome de carbone central de la molécule (i) est asymétrique ce qui donne lieu à deux diastéréoisomères différents.

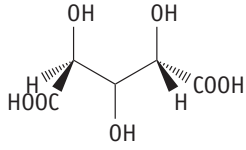
**c.** La molécule (i) est achirale et est reliée par une relation de diastéréoisomérie aux molécules (ii) et (iii). Ces dernières forment un couple d'énantiomères.

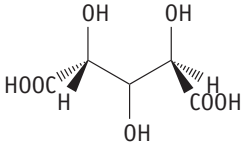


(i)

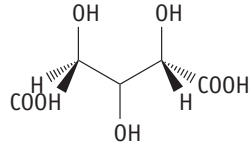



=



(ii)

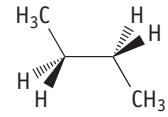


(iii)

### 30 Molécule de butane

**a.** Des conformations d'une même molécule sont reliées entre elles par une rotation autour de liaisons simples (voir cours p. 311 du manuel de l'élève).

**b.** En utilisant les énergies potentielles, comme en physique, on voit que l'énergie la plus basse (0 kJ.mol$^{-1}$), associée à la conformation du butane la plus stable, est celle de la conformation suivante :



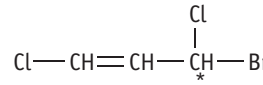

**c.** Sur les deux atomes de carbone de la liaison $C^{(2)}$—$C^{(3)}$, les plus gros groupes sont des —$CH_3$.
La conformation la plus stable est celle dans laquelle les —$CH_3$ sont le plus éloignés les uns des autres.

**d.** La conformation la plus instable est celle de plus haute énergie, à savoir dans le cas étudié ici 19 kJ.mol$^{-1}$.
Les deux gros groupements sont alors le plus proche possible, en vis-à-vis.

## Approfondissement

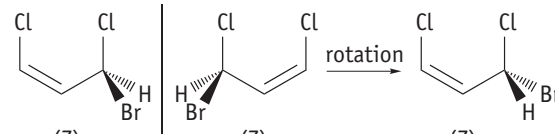
### 31 Étude d'un alcène

**a.** La molécule possède un unique atome de carbone asymétrique.
Elle est donc chirale.



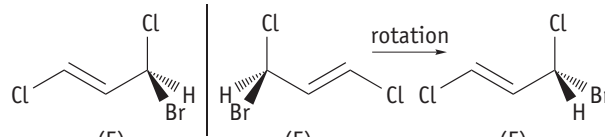

**b.** La molécule possède également une double liaison différemment substituée, à l'origine d'une diastéréoisomérie Z/E.

**c.**



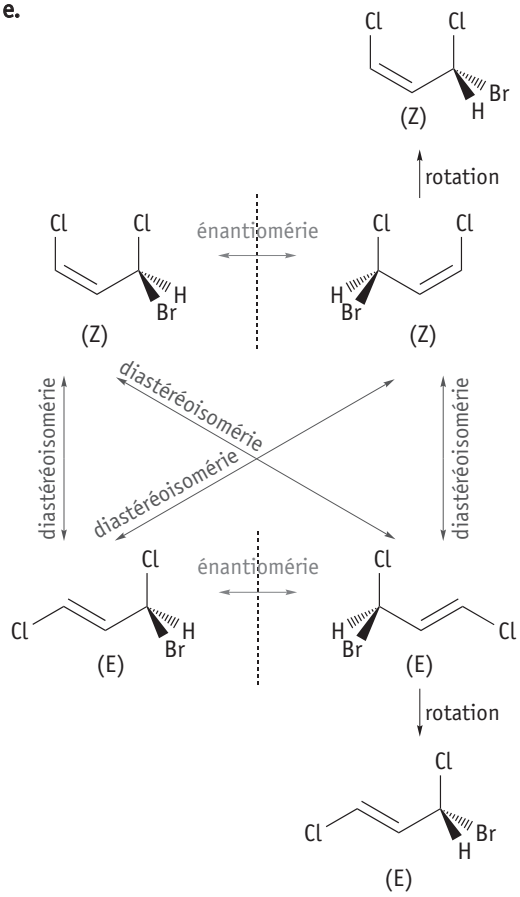
(Z) énantiomère 1 (Z) énantiomère 2 (Z)

**d.**



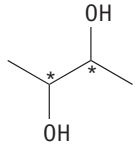
(E) énantiomère 1 (E) énantiomère 2 (E)

**e.**



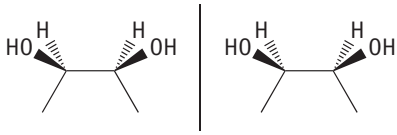

## 32 Composé méso

**a.** Les atomes de carbone 1 et 4 sont reliés à trois atomes d'hydrogène, ils ne sont donc pas asymétriques. Les deux autres atomes de carbone sont reliés à un atome d'hydrogène, un groupe —$CH_3$, un groupe —OH et un groupe —$CH(OH)CH_3$.
Ils sont liés à quatre atomes ou groupes d'atomes différents et sont donc asymétriques.

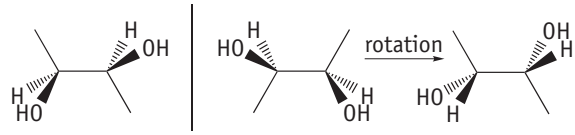



**b.** La molécule 1 est identique à son image dans un miroir plan, elle est donc achirale. La molécule 2 n'est pas superposable à son image dans un miroir plan, elle est donc chirale.

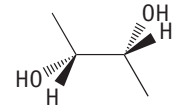
Molécule 1



Molécule 2

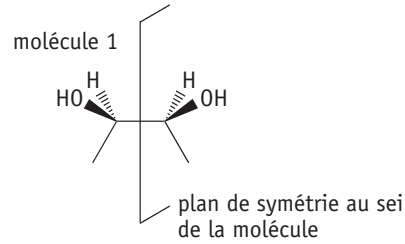



**c.** Voir la figure précédente ; il s'agit de l'image miroir de la molécule 2.



**d.** Les molécules 2 et 3 sont énantiomères et elles ont une relation de diastéréoisomérie avec la molécule 1. La molécule 1 est la molécule achirale qui est appelée « composé méso ».

**e.**




## 33 Étude des hélicènes

**a.** Les atomes de carbone de cette molécule ne sont pas reliés à quatre groupes différents. Ils sont tous mis en jeu dans des liaisons doubles carbone═carbone.
La molécule ne possède donc pas d'atome de carbone asymétrique.

**b.** Les molécules ne sont pas superposables.
La molécule I est donc chirale.

**c.** I et II sont images l'une de l'autre dans un miroir plan et ne sont pas superposables, elles sont donc reliées par une relation d'énantiomérie.

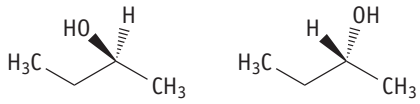
**d.** Cet exemple d'hélicène nous montre qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un atome de carbone asymétrique pour qu'une molécule soit chirale.
De même, l'exercice précédent sur les composés méso souligne que la présence d'un ou plusieurs atomes de carbone asymétrique n'est pas une condition suffisante pour qu'une molécule soit chirale.
La présence d'un unique atome de carbone asymétrique est toutefois une condition suffisante pour qu'une molécule soit chirale.

**e.** Exemples d'objets de la vie courante : escalier en colimaçon, coquillages…

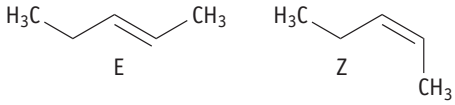
## Exercices de BAC

### 34 Identification des isomères

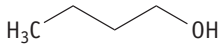
**a.** Le butan-2-ol est chiral car il possède un unique atome de carbone asymétrique. Il existe donc un couple d'énantiomères.




**b.** Le pent-2-ène possède une double liaison C═C substituée par des groupes d'atomes différents, il présente donc une diastéréoisomérie Z—E.



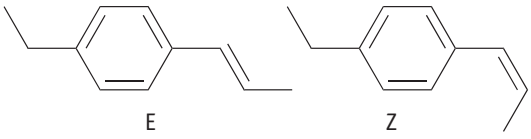

**c.** Un isomère de position du butan-2-ol est le butan-1-ol.




### 35 En parfumerie

**a.** L'estragol et l'anéthol ont la même formule brute, mais ont une formule semi-développée différente. Il s'agit d'isomères de constitution, plus précisément d'isomères de position de la fonction alcène.

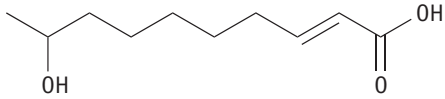
**b.** L'anéthol présente une diastéréoisomérie due à la présence d'une double liaison C═C substituée par des groupes d'atomes différents.



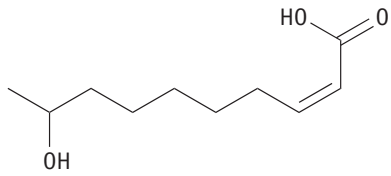

### 36 Les phéromones

**1.a.**

E-acide 9-hydroxydéc-2-ènoïque




Z-acide 9-hydroxydéc-2-ènoïque



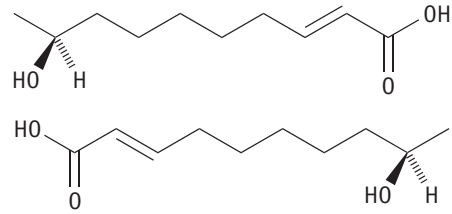

**b.** $H_3C—C^*HOH—(CH_2)_5—CH═CH—COOH$

L'atome de carbone identifié est lié à quatre groupes d'atomes différents :

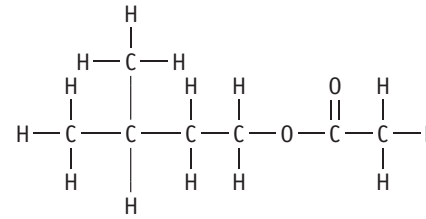
($—CH_3$ ; —OH ; $—(CH_2)_5—CH═CH—COOH$ ; —H), il s'agit donc d'un atome de carbone asymétrique.

**c.** La molécule A possède un unique atome de carbone asymétrique, elle est donc chirale.

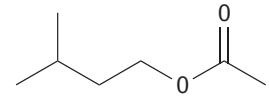
**d.** Pour la double liaison en E, on a le couple d'énantiomères suivant :




**2.a.** Formule développée :



Formule topologique :




**b.** La molécule B ne possède pas d'atome de carbone asymétrique.

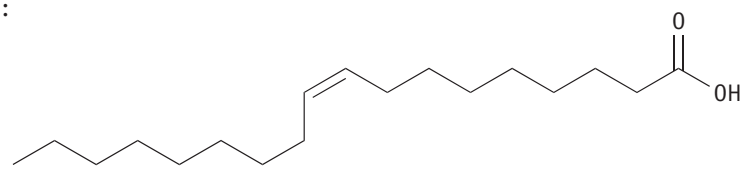
### 37 Les huiles végétales

**1.a.** L'acide palmitique et l'acide stéarique sont des acides gras saturés.

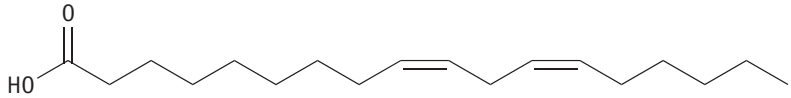
L'acide oléique est un acide gras mono-insaturé et l'acide linoléique un acide gras polyinsaturé (deux doubles liaisons C═C).

**b.** Les atomes de carbone reliés à quatre atomes ou groupes d'atomes dans les molécules d'acide palmitique et d'acide stéarique sont reliés à au moins deux atomes d'hydrogène : les deux molécules ne comportent pas d'atome de carbone asymétrique. Elles ont des longueurs de chaîne différentes (16 et 18 atomes de carbone).

**c.** Acide oléique :



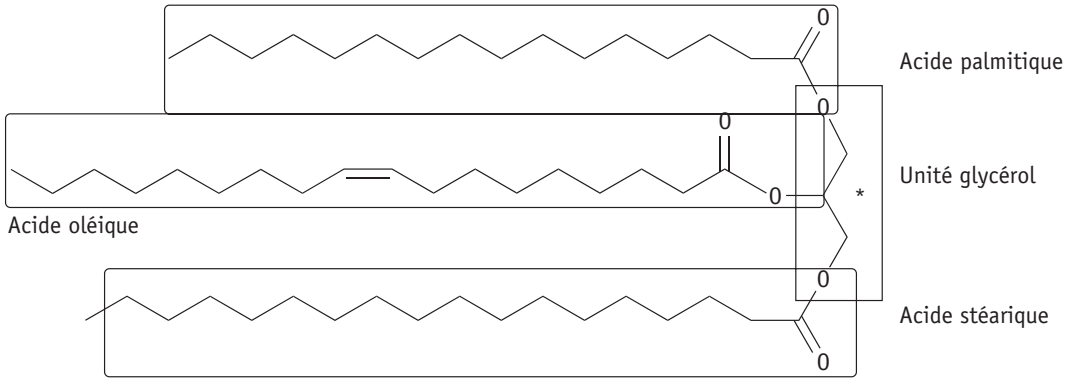

Acide linoléique :




**d.** Des diastéréoisomères possibles : (Z)(E), (E)(Z), et (E)(E).

**2.** Le glycérol ne comporte pas d'atome de carbone asymétrique. Les atomes de carbone en bout de chaîne sont liés à deux atomes d'hydrogène et l'atome de carbone du milieu est relié deux fois au même groupe ($—CH_2OH$).

**3.a.**




**b.** Le triglycéride POS comporte un atome de carbone asymétrique, identifié par un astérisque sur la figure précédente.

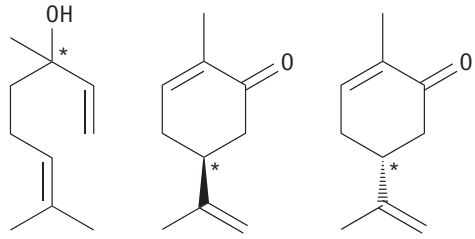
---

### 38 Structures et propriétés de parfums

**a.** Le géraniol et le nérol possèdent la même formule semi-développée, mais présentent une diastéréoisomérie du fait d'une liaison double C═C substituée par des groupes d'atomes différents. Le géraniol et le nérol sont des diastéréoisomères (respt. E, Z).

**b.** Deux diastéréoisomères n'ont pas les mêmes propriétés physico-chimiques, la différence d'odeur est donc cohérente avec la relation de diastéréoisomérie.

**c.**




**d.** Les molécules de linalol, de L-carvone et de D-carvone possèdent chacune un unique atome de carbone asymétrique, elles sont donc chirales.

**e.** La D-carvone et la L-carvone sont images l'une de l'autre par un miroir plan. Il s'agit d'un couple d'énantiomères, mais elles n'ont pas la même odeur.

### 39 Mode d'action d'une enzyme

**a.** Il n'y a pas de rotation possible autour d'une double liaison C═C.

**b.** $HOOC—C^*H(OH)—CH_2—COOH$

L'atome de carbone identifié par l'astérisque est lié à quatre atomes et groupes d'atomes différents (—COOH ; —OH ; $—CH_2—COOH$ ; —H), il s'agit donc d'un atome de carbone asymétrique.

**c.** L'atome de carbone n'est pas au centre d'un tétraèdre. L'absence de représentation tridimensionnelle ne permet pas de distinguer les deux acides maliques.

**d.** Les acides maliques A et B possèdent chacun un atome de carbone asymétrique. Il s'agit de molécules chirales. Elles sont énantiomères l'une de l'autre.

**e.** (1) fumarique, (2) maléique, (3) énantiomères, (4) A.

## Rédiger une synthèse de documents

### 40 Pertinence de la 3e dimension

*Pistes de réponses et mots-clés*

La première idée importante pour répondre à la question concerne la **différence entre les représentations planes et tridimensionnelles** des composés des **figures 1** et **2** (p. 331 du manuel de l'élève). Ainsi, les deux énantiomères de la carvone **(Fig. 1)** représentés en formule plane sont identiques. Il en est de même pour les deux énantiomères de la **figure 2**. Les outils de représentation de la Première S ne sont donc pas assez performants.

La seconde idée doit développer, avec à l'appui les textes des documents 1 et 2, que les énantiomères ont des **propriétés différentes**, donc qu'il est important de savoir les **représenter différemment**.

### 41 Conséquence de la chiralité

*Pistes de réponses et mots-clés*

Axes à voir apparaître :

• **Chiralité des objets macroscopiques** (mains, coquillages, dessins géométriques).
Exemple d'interaction avec un autre objet chiral : les mains et les gants.

• **Chiralité dans le corps humain** [les acides aminés, les protéines (enzymes, récepteurs…)].

• Importance de la **chiralité dans les interactions entre molécules** (médicaments chiraux avec récepteurs biologiques chiraux ; molécules odorantes avec les récepteurs olfactifs ou du goût).

Chapitre 13

# Transformations en chimie organique

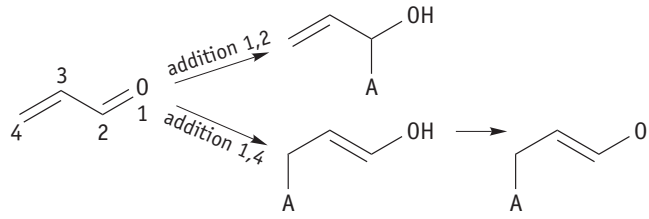
## Introduction au chapitre (p. 334)

Ce premier chapitre de la partie « Structure et transformation de la matière » propose une première approche de la réactivité en chimie organique. Situé dans la partie *Comprendre*, les notions qui doivent être introduites ont rapport aux lois et aux modèles. Il s'agit d'enseigner les bases de la façon dont les chimistes organiciens interprètent la réactivité. Le premier niveau d'interprétation, que le programme qualifie de « *macroscopique* » (ce n'est pas exactement le même sens que le niveau macroscopique du chapitre 15), catégorise les réactions en substitution, addition et élimination. Dans un second temps, le programme requiert une analyse plus fine de la réactivité en imposant d'étudier les formations et les ruptures de liaisons avec le formaliste des flèches courbes. Il nomme cela le « *niveau microscopique* ».

Au niveau macroscopique, les catégories de réactions ont été considérées dans les cas les plus simples.
Le programme ne statuant pas sur les définitions à proposer, nous avons choisi de définir :

- la substitution en termes de remplacement d'un atome ou d'un groupe d'atomes,
- l'addition a été limitée à la double et à la triple liaison carbone — carbone ; cela ignore les additions sur les carbonyles par exemple,
- l'élimination a été définie dans le cas de la formation d'une liaison multiple, en centrant les exemples sur la formation des alcènes, ignorant par exemple les formations de cycles.

Au niveau microscopique, la compréhension de la réactivité est basée sur les interactions entre sites donneurs et sites accepteurs d'électrons, que les élèves doivent apprendre à repérer au moyen d'une table d'électronégativité. Il s'agit d'une approche étudiant les sites électrophiles (notés $\delta^+$) et nucléophiles (notés $\delta^-$) des molécules sans utiliser ces termes. Ce modèle, en faisant apparaître les charges partielles, est donc purement électrostatique. Nous avons choisi de ne pas exposer les limites d'un tel modèle qui permet, par exemple, d'interpréter l'addition 1,2 et non l'addition 1,4 sur une énone :




Cette limite est due à l'absence, dans le programme, de la notion de mésomérie. Ce programme, s'il impose la notion de mécanisme réactionnel et le formalisme des flèches courbes, limite les compétences exigibles à savoir mettre ces flèches pour représenter les formations et les ruptures de liaisons. Il n'est donc pas question pour les élèves de connaître des mécanismes par cœur, mais d'être confronté à des étapes de mécanisme et à savoir leur donner du sens. En proposant une initiation aux mécanismes réactionnels et en soulignant leur importance pour la compréhension des réactions chimiques, ce chapitre prépare les élèves à aborder le chapitre 20 dans la partie *Agir* : « Synthétiser des molécules et fabriquer de nouveaux matériaux ».

## Activités

### 1 Chaîne carbonée et groupes caractéristiques (p. 334)

#### *Objectif*

Cette activité permet de réinvestir les notions de nomenclature introduites dans la classe de première sur les alcools et les cétones.

L'élève est alors amené à identifier le type de modification, de chaîne ou de groupe caractéristique, mis en jeu en s'appuyant sur l'analyse de la structure du produit et du réactif.

#### *Correspondance avec le programme*

- Reconnaître les groupes caractéristiques dans les alcool, aldéhyde, cétone, acide carboxylique, ester, amine, amide.

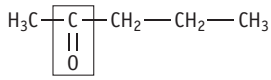
• Utiliser le nom systématique d'une espèce chimique organique pour en déterminer les groupes caractéristiques et la chaîne carbonée.

• Distinguer une modification de chaîne d'une modification de groupe caractéristique.

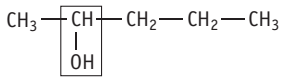
### *Corrigé*

**a.**

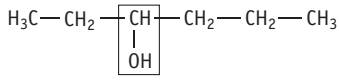
Molécule A : pent-2-one



Molécule B : pentan-2-ol



Molécule C : hexan-3-ol

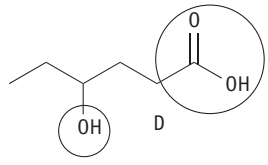


**b.** Les molécules A et B ont la même chaîne carbonée (celle du pentane) cependant, leurs groupes caractéristiques sont différents. La transformation de A en B est donc une modification de groupe.

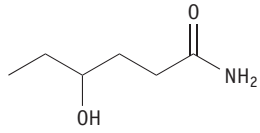
**c.** Les molécules B et C ont toutes les deux un groupe —OH, cependant leurs chaînes carbonées sont différentes. La transformation de B en C est donc une modification de chaîne.

**d.** L'acide 4-hydroxyhexanoïque présente la chaîne carbonée de la molécule d'hexane.

**e.** Pour obtenir D il faut placer le groupe OH en position 4 et le groupe COOH en position 1



**f.** La structure du 4-hydroxyhexanamide est :



Cette molécule présente la même chaîne carbonée que la molécule D, cependant un des groupes caractéristiques est différent. Le passage de l'une à l'autre constitue donc une modification de groupe.

### *Commentaires*

• Par « chaîne carbonée », nous nous limiterons, dans ce chapitre, à la chaîne carbonée principale et, ainsi, nous ne considérons pas les chaînes carbonées latérales.

• Pour la question **c.**, la transformation de B en C ne pourrait être, expérimentalement, une transformation en une seule étape, alors que celle entre A et B est une classique réduction de cétone en alcool secondaire.

## 2 Catégories de réaction (p. 335)

### *Objectif*

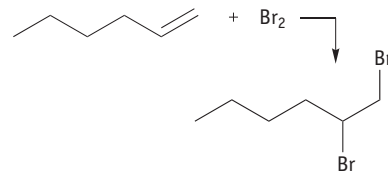
Cette activité permet de familiariser l'élève avec les catégories de réactions. Pour chaque cas, il doit décrire ce qui est ajouté et/ou retiré de la molécule pour retrouver l'une des catégories définies dans le cours. Il est intéressant de demander à l'élève de dresser dans chaque cas un bilan des liaisons rompues et formées.

### *Correspondance avec le programme*

Déterminer la catégorie d'une réaction (substitution, addition, élimination) à partir de l'examen de la nature des réactifs et des produits.

### *Corrigé*

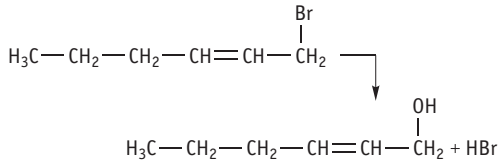
**a.** La molécule de dibrome s'additionne sur la double liaison de la façon suivante :



**b.** Les atomes de brome viennent s'ajouter de part et d'autre de la double liaison et cette dernière disparaît, il s'agit donc d'une addition.

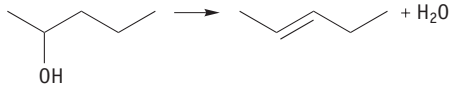
**c.** La molécule B est obtenue à partir de la molécule A en retirant un atome de brome et un atome d'hydrogène de deux atomes voisins et en formant une double liaison entre ces deux atomes de carbone : il s'agit donc d'une réaction d'élimination.

**d.** La transformation implique le départ d'un atome de brome qui est remplacé par un groupe OH : il s'agit donc d'une réaction de substitution.



*Remarque :* en fait, ce n'est pas un atome de brome mais un ion bromure qui est remplacé par un groupe $HO^-$. Pour les élèves, une telle nuance est probablement prématurée.

**e.** Au cours de la réaction, il y a départ d'un groupe OH et d'un atome d'hydrogène (d'où l'identification de C à $H_2O$) de deux atomes voisins et formation d'une double liaison entre ces deux atomes de carbone ; il s'agit donc d'une réaction d'élimination.



**f.** Le bilan des atomes et des charges montre que D est un ion chlorure $Cl^-$. La réaction implique le départ d'un atome de chlore qui est remplacé par un groupe OH ; il s'agit donc d'une réaction de substitution.

## 3 Comprendre une réaction de substitution (p. 336)

### *Objectif*

Cette activité permet d'aborder l'aspect microscopique des réactions en étudiant une réaction de substitution. Pour cela, les notions d'électronégativité et de polarisation déjà introduites en Première S sont réinvesties. L'élève peut alors trouver l'existence des sites donneurs et accepteurs dans les molécules. Le mécanisme est présenté en étudiant la formation et la rupture de liaisons de manière séparée. L'élève raisonne sur les sites donneurs et accepteurs pour placer les flèches courbes correspondantes.

### *Correspondance avec le programme*

• Déterminer la polarisation des liaisons en lien avec l'électronégativité (table fournie).

• Identifier un site donneur, un site accepteur de doublet d'électrons.

• Pour une ou plusieurs étapes d'un mécanisme réactionnel donné, relier par une flèche courbe les sites donneur et accepteur en vue d'expliquer la formation ou la rupture de liaisons.

### *Corrigé*

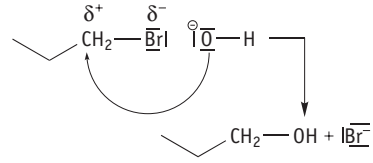
**a.** La liaison C — Br est polarisée car les électronégativités du carbone (2,6) et du brome (3,0) sont différentes. L'atome de brome étant plus électronégatif, il attire à lui les électrons constituant la liaison C — Br et présente donc un excès d'électron représenté par une charge partielle $\delta^-$. L'atome de carbone présente en contrepartie un défaut d'électron représenté par une charge partielle $\delta^+$.

**b.** Dans la molécule de bromoéthane, seule la liaison C — Br est polarisée. L'atome de brome portant la charge partielle négative constitue un site donneur, tandis que l'atome de carbone portant la charge partielle positive constitue un site accepteur de doublets d'électrons.

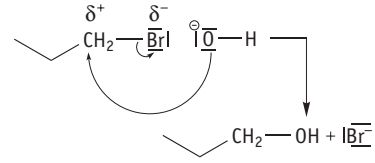
**c.** La structure de Lewis de l'ion hydroxyde fait apparaître les doublets non-liants sur l'atome d'oxygène ainsi qu'une charge négative sur ce même atome.

**d.** L'atome d'oxygène porte une charge négative, il s'agit donc d'un site donneur de doublets d'électrons.

**e.** La flèche courbe montre le mouvement des électrons entre l'atome d'oxygène de l'ion hydroxyde et l'atome de carbone constituant le site accepteur de la molécule de bromoéthane. Une liaison est donc formée entre ces deux atomes.



**f.** La rupture de la liaison C — Br est symbolisée par une flèche courbe partant de la liaison à rompre et allant sur l'atome le plus électronégatif qui récupère les électrons.



**g.** La formation de la liaison C — O transforme l'un des doublets non-liants portés par l'atome d'oxygène dans l'ion hydroxyde en doublet liant entre l'atome de carbone et l'atome d'oxygène.

**h.** L'autre flèche représente la transformation du doublet liant C—Br en un doublet non-liant sur l'ion $Br^-$.

***Commentaires***

• Pour la question **c.** il faut prendre garde à ce que les élèves ne confondent pas les doublets d'électrons et la charge. Ainsi, l'atome O est entouré de 3 doublets non liants, et non pas de trois doublets non liants plus un électron qui serait la charge (–). La charge (–) traduit le fait que l'atome O est entouré de 7 électrons (un de la liaison, et 6 des trois doublets) et que cela représente un électron de plus que l'atome (neutre) O qui est entouré de 6 électrons sur sa couche externe.

• Pour la question **f.** il s'agit d'une bonne occasion pour rappeler aux élèves qu'un atome de carbone possède au plus 4 atomes ou groupes d'atomes voisins, et qu'il ne faut donc pas représenter d'atome de carbone pentavalent.

• Pour la question **h.** un choix a été fait, dans ce chapitre, pour identifier un site donneur et site accepteur. Au niveau de la classe de Terminale, la présence de charges négatives entières ou partielles semble être un critère suffisant pour indiquer la présence d'un doublet non liant. De même une charge positive indique la présence d'un site accepteur. Il existe cependant des contre-exemples à ces règles très simplifiées.

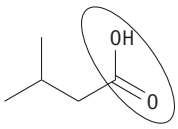
Il paraît toutefois judicieux d'insister sur la nécessité de la présence d'un doublet non liant pour un site donneur, et donc de faire débuter une flèche courbe à partir non de la charge, mais du doublet.

# Exercices

## Applications

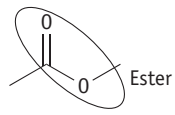
### 1 Composés monofonctionnels

**a.**

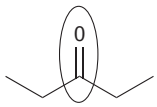



Acide carboxylique

**b.**

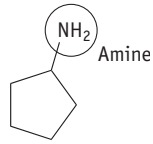



**c.**




Cétone

**d.**

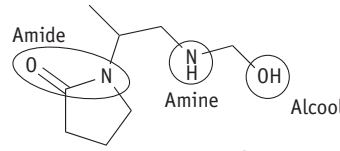



### 2 Composés bifonctionnels

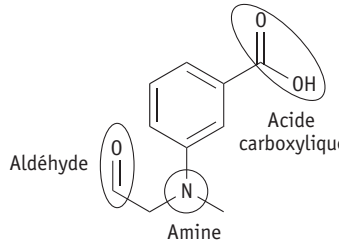
*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 3 Composés polyfonctionnels

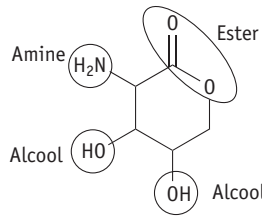
**a.**




**b.**




**c.**




### 4 Nomenclature des amines

**a.** La propanamine présente la chaîne carbonée du propane et le groupe caractéristique amino $NH_2$ d'une fonction amine.

**b.** La N-méthylméthanamine présente la chaîne carbonée du méthane et le groupe caractéristique amino NHR d'une fonction amine.

**c.** L'acide 2-aminopropanoïque présente la chaîne carbonée du propane et le groupe caractéristique carboxyle COOH d'une fonction acide carboxylique ainsi que le groupe caractéristique amino NHR d'une fonction amine.

**d.** L'acide N-propyl-2-aminepropanoïque présente la chaîne carbonée du propane et les groupes caractéristiques NHR et COOH des fonctions amine et acide carboxylique.

### 5 Nomenclature

**a.** L'acide 2-hydroxypentanoïque présente la chaîne carbonée du pentane et les groupes caractéristiques carboxyle COOH et hydroxyle OH des fonctions acide carboxylique et alcool respectivement.

**b.** L'hexanamide présente la chaîne carbonée de l'hexane et le groupe caractéristique $CONH_2$ d'une fonction amide.

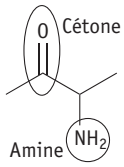
**c.** Le 3-amino-2-hydroxypropanal présente la chaîne carbonée du propane et les groupes caractéristiques hydroxyle OH, amino $NH_2$ et carbonyles CHO des fonctions alcool, amine et aldéhyde respectivement.

**d.** Le N-éthyl-3-hydroxypentanamide présente la chaîne carbonée du pentane et les groupes caractéristiques hydroxyle OH et CONHR des fonctions alcool et amide respectivement.

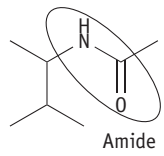
**e.** La 4-hydroxyhexan-2-one présente la chaîne carbonée de l'hexane et les groupes caractéristiques hydroxyle OH et carbonyle C═O des fonctions alcool et cétone respectivement.

### 6 Quels groupes caractéristiques ?

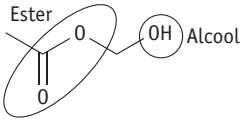
**a.**



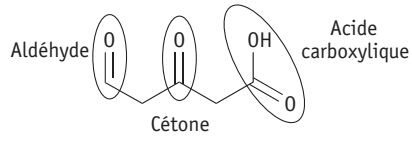

**b.**



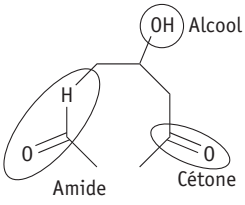

**c.**



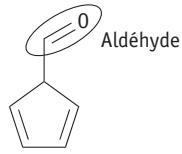

**d.**




**e.**




**f.**




### 7 Décoder les noms systématiques

**a.** Le N'N-diméthylpropanamide présente la chaîne carbonée du propane (3 atomes de carbone) et le groupe caractéristique $CONMe_2$ d'une fonction amide.

**b.** L'éthanoate de 3-aminopropyle présente la chaîne carbonée de l'éthane (2 atomes de carbone) et les groupes caractéristiques amino —$NH_2$ et carboxyle —COOR des fonctions amine et ester respectivement.

**c.** L'acide éthanoïque présente la chaîne carbonée de l'éthane (2 atomes de carbone) et le groupe caractéristique carboxyle COOH d'une fonction acide carboxylique.

**d.** Le butanal présente la chaîne carbonée du butane (4 atomes de carbone) et le groupe caractéristique carbonyle CHO d'une fonction aldéhyde.

**e.** Le 2,4-diaminoheptane présente la chaîne carbonée de l'heptane (7 atomes de carbone) et deux groupes caractéristiques amino —$NH_2$ de deux fonctions amine.

### 8 Modification de chaîne ou de groupe ?

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 9 À partir de la nomenclature

**a.** Le réactif et le produit présentent tous deux la chaîne carbonée de l'éthane. L'éthanol présente un groupe —OH alors que l'acide éthanoïque présente un groupe COOH. Il s'agit donc d'une modification de groupe caractéristique.

**b.** Le réactif et le produit présentent tous deux la chaîne carbonée du propane. La propanamine présente un groupe —$NH_2$ tandis que le propan-1-ol présente un groupe —OH. Il s'agit donc d'une modification de groupe caractéristique.

**c.** Le réactif et le produit présentent tous deux un groupe caractéristique —OH. Le 3-hydroxybutane présente la chaîne carbonée du butane tandis que le 3-hydroxyhexane présente celle de l'hexane. Il s'agit donc d'une modification de chaîne carbonée.

**d.** Le réactif et le produit présentent tous deux la chaîne carbonée du pentane. Le pentanoate de méthyle présente le groupe COOMe tandis que le pentanamide présente le groupe $CONH_2$. Il s'agit donc d'une modification de groupe caractéristique.

**e.** Le réactif et le produit présentent tous deux un groupe caractéristique COOH. L'acide pentanoïque présente la chaîne carbonée du pentane tandis que l'acide heptanoïque présente celle de l'heptane. Il s'agit donc d'une modification de chaîne carbonée.

*Remarque :* les réactions de modification de chaîne mentionnées ici ne se réalisent pas en une seule étape, mais en plusieurs.

### 10 Catégorie de réaction

**a.** Un groupe OH et un atome d'hydrogène sont ajoutés sur deux atomes de carbone reliés par une double liaison avec disparition de celle-ci dans le produit. Il s'agit donc d'une réaction d'addition.

**b.** Le groupe OH initialement présent est remplacé par le groupe $NH_2$, il s'agit donc d'une réaction de substitution.

**c.** Un atome de brome et un atome d'hydrogène sont retirés de deux atomes de carbone voisins entre lesquels se forme une double liaison.
Il s'agit donc d'une réaction d'élimination.

### 11 Addition, élimination, substitution

**a.** Deux atomes d'hydrogène sont ajoutés de part et d'autre d'une triple liaison avec disparition de celle-ci pour former une double liaison. Il s'agit d'une réaction d'addition.

**b.** Un groupe OH et un atome d'hydrogène sont retirés de deux atomes de carbone voisins entre lesquels se forme une double liaison. Il s'agit d'une réaction d'élimination.

**c.** Deux atomes de brome sont ajoutés de part et d'autre d'une double liaison C═C et celle-ci disparaît. Il s'agit d'une réaction d'addition.

### 12 Polarisation de la liaison

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 13 Électronégativité et polarisation

**a.** Les électronégativités des éléments hydrogène et fluor sont respectivement 2,2 et 4,0.
On a donc : $^{\delta+}H—F^{\delta-}$.

**b.** Une liaison reliant deux atomes du même élément n'est pas polarisée.

**c.** Les électronégativités des éléments hydrogène et carbone sont respectivement 2,2 et 2,6. On a donc : $^{\delta+}H—C^{\delta-}$.Cependant, à cause de la faible différence d'électronégativité, la polarisation, sera négligée. Une liaison C — H n'est donc pas polarisée.

**d.** Les électronégativités des éléments carbone et fluor sont respectivement 2,6 et 4,0. On a donc : $^{\delta+}C—F^{\delta-}$.

### 14 Sites donneurs et accepteurs

**a.** L'atome d'oxygène est porteur d'une charge partielle négative et constitue un site donneur. L'atome de carbone portant une charge partielle positive constitue quant à lui un site accepteur de doublets d'électrons.

**b.** L'atome d'oxygène est porteur d'une charge entière négative et constitue donc un site donneur de doublets d'électrons.

**c.** Les atomes d'oxygène et d'azote sont porteurs de charges partielles négatives et constituent donc des sites donneurs de doublets d'électrons. L'atome de carbone portant une charge partielle positive constitue quant à lui un site accepteur de doublets d'électrons.

### 15 Quels sites ?

**a.** La double liaison C═C constitue un site donneur de doublets d'électrons.

**b.** L'atome d'hydrogène est porteur d'une charge entière positive et constitue donc un site accepteur de doublets d'électrons.

**c.** La liaison C — O est polarisée, l'atome d'oxygène étant plus électronégatif il est porteur d'une charge partielle négative tandis que l'atome de carbone qui lui est lié est porteur d'une charge partielle positive. Il en découle que l'atome d'oxygène constitue un site donneur de doublet d'électrons tandis que l'atome de carbone qui lui est lié est un site accepteur. (on peut également considérer que la liaison O — H est polarisée et donc que l'atome d'hydrogène est un site accepteur).

### 16 Étapes d'un mécanisme

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 17 Formation ou rupture de liaison

**a.** L'atome de chlore est plus électronégatif que l'atome de carbone qui lui est lié. La flèche courbe représente donc la rupture de la liaison C — Cl au cours de laquelle les électrons vont vers l'atome le plus électronégatif.

**b.** L'atome de brome est plus électronégatif que l'atome de carbone qui lui est lié. La flèche courbe partant de la liaison C—Br et allant vers l'atome de brome représente donc la rupture DE cette liaison au cours de laquelle les électrons vont vers l'atome le plus électronégatif. L'atome d'oxygène de l'ion $HO^-$ est porteur d'un doublet d'électrons non liant tandis que l'atome de carbone lié au brome est porteur d'une charge partielle positive et constitue donc un site accepteur de doublet d'électrons. La flèche courbe partant du site donneur pour aller sur le site accepteur représente la formation de la liaison C—O

**c.** L'atome d'azote de la molécule d'éthanamine est porteur d'un doublet d'électrons non partagé : c'est donc un site donneur.

Par ailleurs, l'atome de carbone portant la charge positive constitue un site accepteur de doublets d'électrons. La flèche courbe partant du site donneur pour aller sur le site accepteur représente la formation de la liaison C—N.

**d.** L'atome d'iode est plus électronégatif que l'atome de carbone qui lui est lié. La flèche courbe représente donc la rupture de la liaison C—I au cours de laquelle les électrons vont vers l'atome le plus électronégatif.

**e.** L'atome d'oxygène de l'ion $CH_3CH_2O^-$ est porteur d'un doublet non partagé et constitue donc un site donneur de doublet tandis que l'atome de carbone porteur d'une charge positive constitue un site accepteur de doublet d'électrons. La flèche courbe partant du site donneur pour aller sur le site accepteur représente la formation de la liaison C—O.

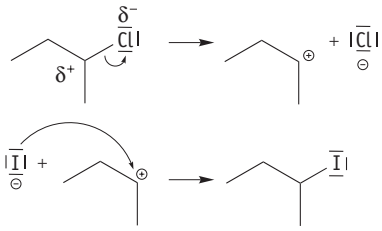
## Entraînement

### 18 Réaction de substitution

**1.a.** Au cours de la première étape, la liaison C—Cl est polarisée et l'atome de chlore porte une charge partielle négative tandis que l'atome de carbone qui lui est lié porte une charge partielle positive. Au cours de la seconde étape, la liaison C—I est polarisée et l'atome d'iode porte une charge partielle négative tandis que l'atome de carbone qui lui est lié porte une charge partielle positive.

**b.** Au cours de la première étape, la liaison polarisée C—Cl est rompue pour former, entre autres, un atome de carbone portant une charge positive qui constitue le site accepteur mis en jeu au cours de la seconde étape. Au cours de la seconde étape, l'ion iodure porte des doublets non liants et constitue un site donneur de doublets d'électrons.

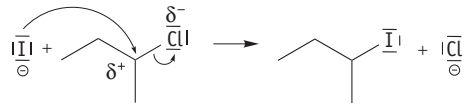
**c.**



**d.** Les électrons de la liaison C—Cl sont emportés par l'atome de chlore formant ainsi l'ion chlorure.

**2.** L'ion iodure constitue un site donneur de doublets d'électrons, l'atome de carbone lié à l'atome de chlore constitue un site accepteur de doublet d'électrons. La formation de la liaison C—I est expliquée par une flèche courbe partant d'un doublet de l'ion iodure pour aller sur l'atome de carbone lié à l'atome de chlore.

La rupture de la liaison C—Cl est expliquée par une flèche courbe partant de la liaison C—Cl et allant vers l'atome de chlore.

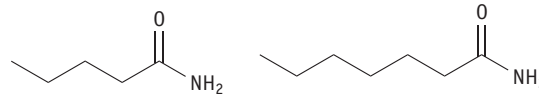


*Remarque* : les mécanismes de substitutions nucléophiles monomoléculaire et bimoléculaire présentés ici sont des mécanismes limites, la réalité est souvent plus complexe et fait intervenir des chemins réactionnels intermédiaires.

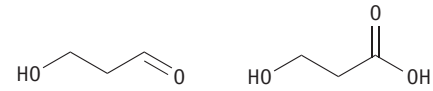
### 19 Type de modification

**a.** Le réactif et le produit présentent tous les deux la chaîne carbonée du butane. Le butan-1-ol présente le groupe caractéristique —OH tandis que la butanamine présente le groupe caractéristique $-NH_2$. Il s'agit donc d'une modification de groupe caractéristique.

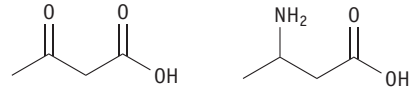
**b.** Le réactif et le produit présentent tous les deux le groupe caractéristique $CONH_2$. Le pentanamide présente la chaîne carbonée du pentane tandis que l'heptanamide présente la chaîne carbonée de l'heptane. Il s'agit donc d'une modification de chaîne carbonée.



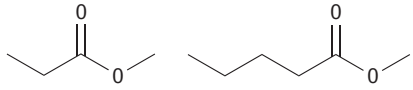
**c.** Le réactif et le produit présentent tous les deux la chaîne carbonée du propane. Le 3-hydroxypropanal présente les groupes caractéristiques —OH et CHO tandis que l'acide 3-hydroxypropanoïque présente les groupes —OH et COOH. Il s'agit donc d'une modification de groupe caractéristique.



**d.** Le réactif et le produit présentent tous les deux la chaîne carbonée du butane. L'acide 3-oxo-butanoïque présente les groupes C=O et COOH tandis que l'acide 3-aminobutanoïque présente les groupes $-NH_2$ et COOH. Il s'agit donc d'une modification de groupe caractéristique.

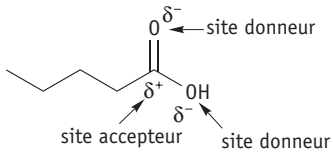


**e.** Le réactif et le produit présentent tous les deux le groupe caractéristique COOMe. Le propanoate de méthyle présente la chaîne carbonée du propane tandis que le pentanoate de méthyle présente la chaîne carbonée du pentane. Il s'agit donc d'une modification de chaîne carbonée.

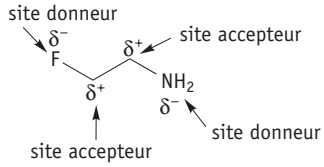


### 20 Polarisation et nature du site

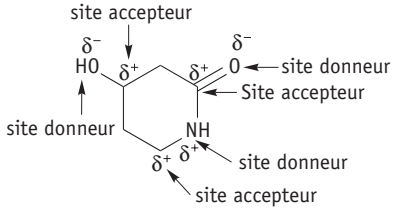
**a.**



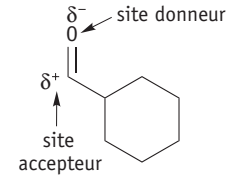

**b.**




**c.**




**d.**




*Remarque* : des sites accepteurs supplémentaires sont les atomes d'hydrogène reliés à des hétéroéléments tels que l'azote ou l'oxygène.

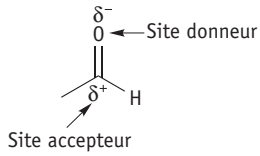
## Approfondissement

### 21 Obtention d'un alcool à partir d'un aldéhyde

**a.** L'ion hydrure a pour structure de Lewis : $|H^{\ominus}$

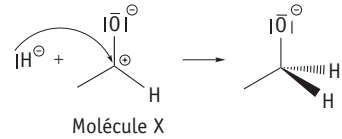
**b.** La présence d'un doublet non liant indique qu'il s'agit d'un site donneur de doublet d'électrons.

**c.**




**d.** Au sein de la molécule X, l'atome d'oxygène est entouré de 7 électrons (2 pour chaque doublet et un pour la liaison covalente) c'est donc un de plus que le nombre d'électrons de valence de cet élément ce qui explique la charge négative. L'atome de carbone, qui est lié à l'atome d'oxygène, n'est entourés que par 3 électrons (un par liaison covalente) ce qui est un de moins que le nombre d'électrons de valence de cet élément, ce qui explique la charge positive.

**e.**




**f.** La chaîne carbonée reste celle de l'éthane au cours de la réaction. Le groupe CHO est remplacé par le groupe $O^-$, il s'agit donc d'une modification de groupe caractéristique. Il s'agit ici d'une réaction d'addition.

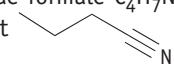
*Remarque* : le groupe $O^-$ est à introduire comme la base conjuguée du groupe OH (alcoolate/alcool).

### 22 Synthèse de nitriles

**a.** La structure de Lewis fait apparaître deux sites donneurs, l'un sur l'atome d'azote et l'autre sur l'atome de carbone, chacun possédant un doublet non-liant.

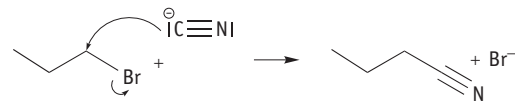
**b.** La liaison C — Br est polarisée, l'atome de brome porte donc une charge partielle négative et constitue donc un site donneur tandis que l'atome de carbone qui lui est lié porte une charge partielle positive et constitue donc un site accepteur.

**c.** La formule brute de X est obtenue en équilibrant l'équation. On a donc X de formule $C_4H_7N$. La formule topologique de X est




:

**d.**




La rupture de la liaison C — Br est représentée par la flèche courbe partant de la liaison pour aller sur l'atome le plus électronégatif, l'atome de brome.

La formation de la liaison C — C est symbolisée par la flèche courbe partant de l'atome de carbone donneur de l'ion cyanure pour aller sur l'atome de carbone accepteur du bromopropane.

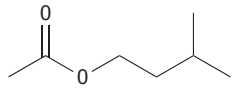
**e.** L'atome de brome est remplacé par le groupe CN, il s'agit donc d'une réaction de substitution.

## Exercices de BAC

### 23 Synthèse de l'arôme de banane

**1.a.** L'acide éthanoïque réagit avec le 3-méthylbutan-1-ol.

**b.**



**c.** L'atome de carbone lié aux deux atomes d'oxygène est un site accepteur tandis que les deux atomes d'oxygène sont des sites donneurs.

**d.** L'atome d'oxygène est un site donneur tandis que l'atome de carbone qui lui est lié est un site accepteur de doublets d'électrons.

**2.a.** Dans l'intermédiaire A, l'atome d'oxygène, qui porte la charge positive, est entouré de 5 électrons (3 liaisons covalentes et un doublet non liant). Un atome d'oxygène a normalement 6 électrons de valence, il y a donc ici une charge positive.

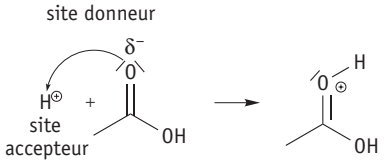
Le même raisonnement peut être appliqué pour expliquer la présence des charges dans les espèces C et D.

Pour l'intermédiaire B, l'atome de carbone, qui porte la charge positive, est entouré de 3 électrons (3 liaisons covalente).

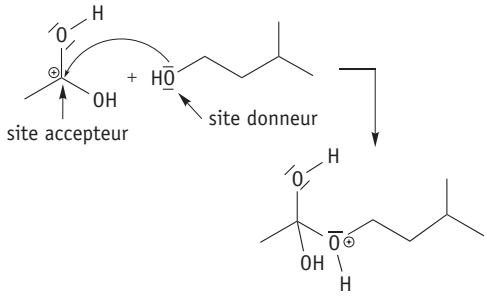
Un atome de carbone a normalement 4 électrons de valence, il a donc ici une charge positive.

**b.**

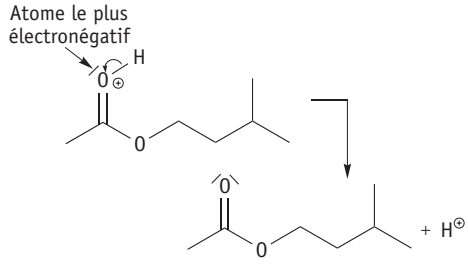
1.




2.




3.




**c.** La molécule E est l'éthanoate de 3-méthylbutyle.

### 24 Craquage des alcanes

**a.** Les alcanes présentent des liaisons simples C—C et C—H. Elles ne sont pas polarisées car la différence d'électronégativité entre les deux éléments chimiques n'est pas assez élevée.

**b.** Les liaisons présentent n'étant pas polarisées, il n'y a pas de sites donneurs ou accepteurs. Les alcanes ne sont donc pas des molécules très réactives.

**c.** A, B et C sont obtenus par des réactions d'élimination (deux atomes d'hydrogènes sont retirés de deux atomes de carbone voisins entre lesquels se forme une double liaison). La réaction forme également du dihydrogène $H_2$.

**d.** Le propane et l'éthane sont obtenus par des modifications de chaîne carbonée. Le terme « craquage » illustre le fait de rompre la chaîne carbonée au sein des alcanes pour obtenir des alcanes plus courts.

**e.** Le propène et l'éthène possèdent des doubles liaisons C=C, ils présentent donc tous deux un site donneur de doublet d'électrons.

**f.** La présence de site donneur sur les alcènes les rend plus réactifs que les alcanes.

### 25 Une synthèse de la méthadone

**a.** La méthadone présente le groupe caractéristique —$NMe_2$ d'une fonction amine et le groupe C=O d'une fonction cétone.

**b.** La modification de A en D correspond à la substitution d'un atome d'hydrogène par une chaîne propène.

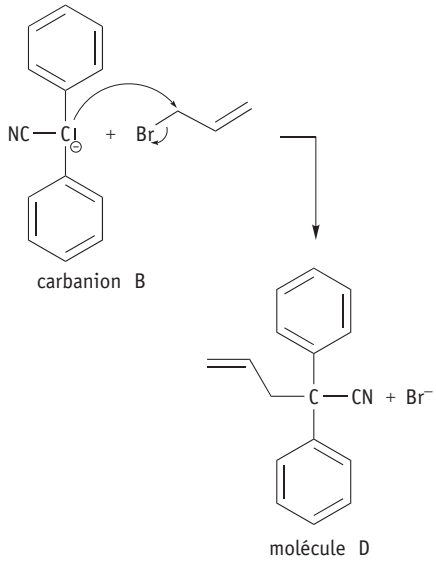
**c.** Au cours de l'étape 2, la liaison C—Br est rompue tandis qu'une liaison C—C est formée entre l'atome de carbone portant la charge négative et l'atome de carbone lié à l'atome de brome dans la molécule de bromopropène.

**d.** La charge négative portée par l'atome résulte de la présence d'un électron excédentaire de cet atome qui porte ainsi un doublet non-liant. Cet atome est donc un site donneur d'un doublet d'électrons.

**e.** Le brome étant plus électronégatif que le carbone, la liaison C—Br est polarisée. L'atome de brome porte trois doublets non liants (et une charge partielle négative) et constitue un site donneur de doublets d'électrons tandis que l'atome de carbone qui lui est lié est porteur d'une charge partielle positive et constitue un site accepteur de doublets d'électrons.

**f.** Le bromopropène réagit par son site accepteur de doublet d'électrons.

**g.**

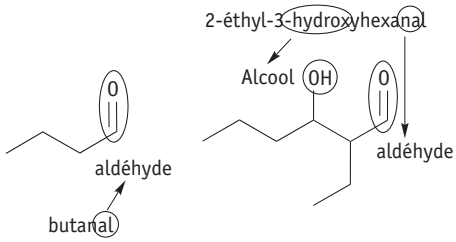



**h.** L'étape 3 consiste à ajouter un atome de brome et un atome d'hydrogène sur deux atomes de carbone initialement liés par une double liaison avec disparition de cette dernière, il s'agit donc d'une réaction d'addition.

**i.** L'étape 4 consiste à remplacer l'atome de brome par le groupe $N(CH_3)_2$, il s'agit donc d'une réaction de substitution.

## 26 Synthèse d'un plastifiant

**a.**

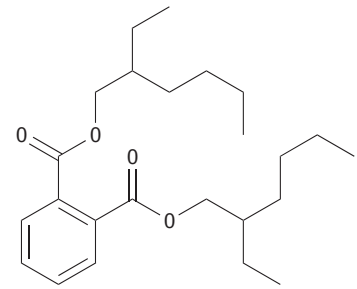



**b.** Au cours de l'étape 2, le groupe OH et un atome d'hydrogène sont retirés de deux atomes de carbone voisins entre lesquels se forme une double liaison, il s'agit donc d'une élimination. Au cours de l'étape 3, deux additions de dihydrogène se font simultanément.

**c.** Le nickel joue le rôle de catalyseur dans la réaction d'addition du dihydrogène.

**d.** L'un des réactifs est un alcool et présente donc un groupe —OH. L'autre réactif est un diacide carboxylique et présente donc deux groupes COOH. Le diester formé présente deux groupes COOR.

**e.** La formule topologique du diester formé est :




## 27 Synthèse de la lidocaïne®

**1.** Les réactifs possèdent un groupe $NH_2$ d'une fonction amine et un groupe $COOCH_3$ d'une fonction ester. Les produits possèdent un groupe CONHR d'une fonction amide et le groupe OH d'une fonction alcool.

*Remarque* : cette molécule se prête à l'introduction de la notion de noyau aromatique et à sa distinction avec les alcènes. (Cette notion peut se limiter au fait que les deux ne mènent pas au même déplacement chimique en RMN).

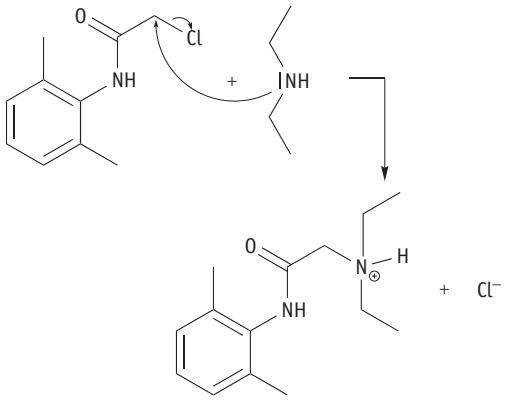
**2.a.** La seconde étape correspond à la substitution de l'atome de chlore par le groupe $N(C_2H_5)_2$.

**b.** L'atome d'azote porte une charge partielle $\delta^-$, c'est un site donneur d'électrons. De plus, les deux atomes de carbone et l'atome d'hydrogène qui lui sont liés étant moins électronégatif, ils portent une charge partielle positive. L'atome d'azote constitue donc un site donneur de doublets d'électrons tandis que les trois autres atomes mentionnés sont des sites accepteurs de doublets d'électrons.

**c.** La molécule A présente cinq liaisons polarisées : la liaison C—Cl, la liaison double C=O, la liaison N—H et les deux liaisons C—N. Au vu du produit, la réaction s'est déroulée au niveau du site accepteur que forme l'atome de carbone relié à l'atome de chlore.

*Remarque* : cette étape peut illustrer la notion de réaction chimiosélective la substitution se faisant sur l'atome de carbone lié à l'atome de chlore et non sur l'atome de carbone de la fonction amide.

**d.**



**e.** La molécule de lidocaïne® présente le groupe CONHR de la fonction amide et le groupe $—N(Et)_2$ de la fonction amine.

### 28 Synthèse de l'α-curcumène

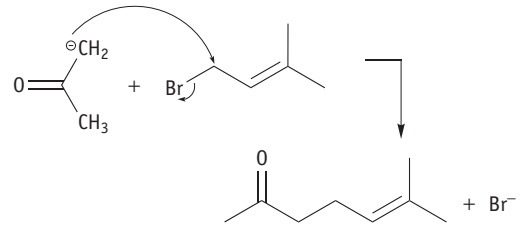
**1.** Lors de la première étape, un atome Br et un atome H sont ajoutés sur une double liaison : il s'agit d'une réaction d'addition. La deuxième étape voit la création d'une double liaison avec le départ d'un atome H et d'un groupe OH : il s'agit d'une élimination.

**2.a.** L'atome de carbone chargé négativement est un site donneur de doublets d'électrons.

**b.** Le brome est porteur d'une charge partielle $\delta^-$, il constitue un site donneur de doublets d'électrons. La molécule C présente aussi une liaison polarisée (la liaison C—Br). Cet atome de carbone est donc porteur d'une charge partielle positive.

Il constitue de ce fait un site accepteur de doublets d'électrons. La double liaison C=C constitue elle aussi un site donneur de doublet d'électrons.

**c.** La molécule C réagit par son site accepteur de doublet d'électrons.



## Rédiger une synthèse de documents

### 29 Copier la nature

*Pistes de réponses et mots-clés*

- Utiliser les techniques de spectroscopie pour définir la structure du produit à synthétiser
- Identifier **la chaîne** et les **groupes caractéristiques** présents dans la **molécule cible**.
- Mettre en place un plan de réaction comprenant des **modifications de chaîne et de groupes** pour obtenir le produit à partir de réactifs à disposition.

Chapitre 14

# Réactions acido-basiques

## Introduction au chapitre (p. 356)

Ce chapitre fait partie du thème *Comprendre* du programme de Terminale S.

La réaction acido-basique est abordée dans la continuité de l'enseignement de Troisième (notion de pH, de domaine d'acidité, ions $H^+$ et $HO^-$) et de Première S (indicateurs colorés, acides carboxyliques).

La principale différence avec l'acidité telle qu'elle était traitée dans le programme de 2002 tient au fait que les $K_a$ étaient des cas particuliers de constante d'équilibre introduits comme une caractéristique des réactions qui ne sont pas toujours totales. L'esprit est complètement différent dans le nouveau programme.

Après avoir défini le pH et rappelé les techniques expérimentales de mesure, la théorie de Brönsted est énoncée et la notion de couples acide/base introduite. La constante d'acidité est, dans ce cadre, définie comme une grandeur caractéristique de la réaction entre un acide faible et l'eau et non plus comme la valeur à l'équilibre d'un quotient de réaction. Le cas des espèces qui comportent plusieurs groupes pouvant échanger des ions $H^+$ est explicitement au programme puisqu'il est demandé de traiter des acides $\alpha$-aminés.

La terminologie fort/faible refait son apparition et l'élève doit savoir distinguer des réactions totales (ou quasi-totales) de réactions partielles et calculer le pH de solutions d'acide fort ou de base forte.

Le programme met l'accent sur l'aspect sécurité des réactions acido-basiques mettant en jeu des acides et des bases forts. Enfin, une ouverture est faite en direction de la biologie, à propos du contrôle du pH. C'est l'occasion de définir la notion de solution tampon et d'évoquer les tampons sanguins.

## Activités

### 1 pH d'une solution aqueuse

(p. 358)

#### *Objectif*

Le but de cette activité est de mesurer puis de comparer le pH de différentes solutions.

Dans une première partie, l'élève mesure le pH de différentes solutions aqueuses et expérimente trois techniques : indicateur coloré, papier pH, pH-mètre et les compare.

Dans une seconde partie, l'élève prépare deux solutions acides : un acide fort (l'acide chlorhydrique) et un acide faible (l'acide éthanoïque), de même concentration. Il compare ensuite le pH mesuré pour les deux solutions. À partir de ces valeurs, il peut conclure quant à la différence de comportement d'un acide fort et d'un acide faible en solution aqueuse.

#### *Correspondance avec le programme*

- Mesurer le pH d'une solution aqueuse.
- Notions d'acide fort et d'acide faible.

#### *Liste du matériel et des produits*

**Par binôme :**

- Trois tubes à essais.
- Quatre fioles jaugées de 100 mL.
- Des pipettes jaugées de 10 mL, 5 mL, 2 mL et 1 mL.
- Trois béchers de 100 mL pour les prélèvements et la mesure de pH.
- Une poire d'aspiration.
- Un agitateur en verre.
- Un barreau magnétique et un système d'agitation magnétique.
- Un pH-mètre, des solutions étalons, une électrode de verre et son support.
- Du papier pH.

**Pour la classe :**

- De l'acide chlorhydrique de concentration 0,10 $mol.L^{-1}$ (environ 100 mL pour 18 binômes).
- Une solution d'acide éthanoïque de concentration 0,10 $mol.L^{-1}$ (environ 100 mL pour 18 binômes).
- Une solution de bleu de bromothymol.
- Une solution d'hélianthine.
- Une solution de phénolphtaléine.
- De l'eau distillée.

### *Corrigé*

**a.** Le pH d'une solution peut s'estimer ainsi : mettre 3 mL de mélange inconnu dans trois tubes à essais différents, numérotés de 1 à 3.
Dans le tube 1, verser quelques gouttes d'hélianthine, dans le tube 2, quelques gouttes de bleu de bromothymol et dans le tube 3, quelques gouttes de phénolphtaléine. En fonction de la couleur de chaque tube, il est possible de savoir si le pH du mélange se situe en-deçà de 4, entre 4 et 7, entre 7 et 9 ou au-delà de 9.

**b.** On dépose une goutte de mélange sur du papier pH.
Les teintes du nuancier de la boîte de papier pH permettent d'estimer le pH.
La valeur est connue à une unité pH près.

**c.** Après avoir étalonné le pH-mètre, rincer l'électrode avec de l'eau distillée puis essuyer.
Introduire l'électrode dans le mélange et lire la valeur du pH affichée sur le pH-mètre.
Le pH est connu à 0,01 unité près.

**d.** La première méthode débouche sur un encadrement grossier de la valeur du pH d'une solution, la deuxième méthode donne une valeur approchée du pH et la troisième méthode, plus précise mais plus longue à mettre en œuvre, fournit une valeur plus précise du pH.

**e.** Les caractéristiques des solutions sont regroupées dans le tableau suivant.

| Concentration des solutions filles ($mol.L^{-1}$) | Facteur de dilution | Volume de solution-mère à prélever (mL) |
|---|---|---|
| $1,0.10^{-2}$ | 10 | 10 |
| $5,0.10^{-3}$ | 20 | 5 |
| $2,0.10^{-3}$ | 50 | 2 |
| $1,0.10^{-3}$ | 100 | 1 |

Les valeurs du pH sont consignées dans le tableau ci-dessous :

| Concentration ($mol.L^{-1}$) | pH calculé avec pH = $-\log[H_3O^+]$ | pH expérimental de l'acide chlorhydrique | pH expérimental de l'acide éthanoïque |
|---|---|---|---|
| $1,0.10^{-2}$ | 2,00 | 2,12 | 3,31 |
| $5,0.10^{-3}$ | 2,30 | 2,37 | 3,44 |
| $2,0.10^{-3}$ | 2,70 | 2,69 | 3,59 |
| $1,0.10^{-3}$ | 3,00 | 2,88 | 3,68 |

**f.** Contrairement au cas de l'acide chlorydrique, on constate que pour l'acide éthanoïque, les valeurs expérimentales diffèrent des valeurs calculées avec pH = $-\log[H_3O^+]$. Les valeurs de pH expérimentales sont plus grandes, ce qui correspond à des solutions moins acides, qui contiennent donc moins d'ions $H_3O^+$ que ce qui est prévu. On peut alors penser que la totalité des molécules d'acide éthanoïque ne se dissocient pas et qu'à l'état final il ne se forme pas autant d'ions oxonium que prévu. Ces mesures montrent que les comportements de l'acide chlorhydrique et de l'acide éthanoïque en solution sont différents : l'acide chlorhydrique semble se dissocier totalement en solution aqueuse, contrairement à l'acide éthanoïque.

## 2 Effet thermique d'une réaction acido-basique (p. 359)

### *Objectif*

Cette activité étudie le caractère exothermique de la réaction chimique entre un acide fort et une base forte à l'aide d'un outil déjà rencontré en Première S : le calorimètre. Après avoir tracé le graphe de l'évolution de la température en fonction du volume de solution d'hydroxyde de sodium ajouté, l'élève compare ses résultats à ceux obtenus lors de l'ajout d'une masse d'hydroxyde de sodium. La fin du questionnement permet à l'élève de réfléchir aux conditions de sécurité dans lesquelles il doit se trouver afin de manipuler correctement et sans danger pour lui et autrui.

### *Correspondance avec le programme*

- Mettre en évidence l'influence des quantités de matière mises en jeu sur l'élévation de température observée.
- Utiliser les symbolismes $\rightarrow$, $\leftarrow$ et $\rightleftharpoons$ dans l'écriture des réactions chimiques pour rendre compte des situations observées.

### *Liste du matériel et des produits*

**Par binôme :**

- Un calorimètre et ses accessoires.
- Un thermomètre.
- Une pipette jaugée de 20 mL avec une poire d'aspiration.
- Une burette graduée de 25 mL.
- Un bécher poubelle.

**Pour la classe :**

• De l'acide chlorhydrique de concentration 6,0 mol.L$^{-1}$ (environ 360 mL pour 18 binômes).

• Une solution d'hydroxyde de sodium de concentration 5,0 mol.L$^{-1}$ (environ 360 mL pour 18 binômes).

***Corrigé***

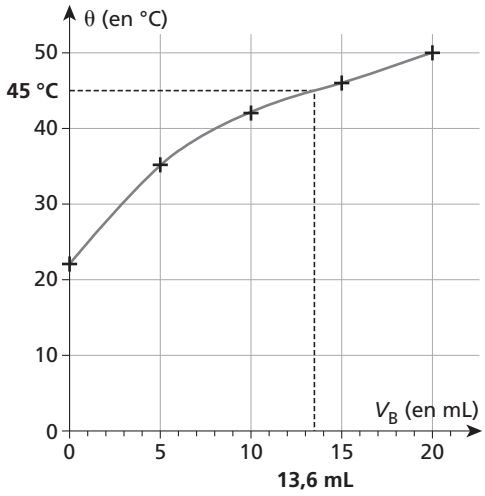
On obtient le tableau suivant :

| $V_B$ (mL) | θ (°C) |
|---|---|
| 0 | 22 |
| 5,0 | 35 |
| 10,0 | 42 |
| 15,0 | 46 |
| 20,0 | 50 |

**a.** L'équation de la réaction s'écrit :

$$H_3O^+ + HO^- \rightarrow 2H_2O$$

**b.** On obtient le graphe suivant :




La température s'élève au fur et à mesure des ajouts de solution d'hydroxyde de sodium.

**c.** Initialement, $n_{H_3O^+,i} = c_A V_A$

$n_{H_3O^+,i} = 6{,}0 \times 20.10^{-3} = 0{,}12\,\text{mol}$

et $n_{HO^-,i} = c_B V_B$

$n_{HO^-,i} = 5{,}0 \times 5{,}0.10^{-3} = 0{,}025\,\text{mol}$

| | Avancement (en mol) | $H_3O^+$ + | $HO^-$ → | 2 $H_2O$ |
|---|---|---|---|---|
| État initial | $x = 0$ | 0,12 | 0,025 | solvant |
| État final | $x = x_f$ | $0{,}12 - x_f$ | $0{,}025 - x_f$ | solvant |

L'avancement est $x_f = 0{,}025$ mol.

Pour un ajout de 5,0 mL, 0,025 mol d'ions $H_3O^+$ et d'ions $HO^-$ ont réagi.

**d.** 0,068 mol d'ions hydroxyde correspond à un volume $V_B$ ajouté de 13,6 mL. Graphiquement, on trouve $\theta \approx 45$°C (voir le graphe de la question **b.**).

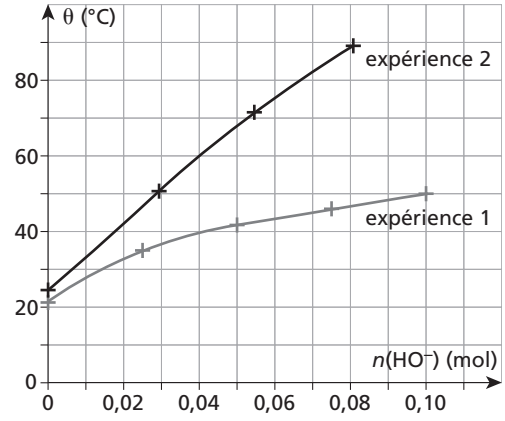
**e.** La masse molaire de l'hydroxyde de sodium vaut 40,0 g.mol$^{-1}$. Les quantités de matière correspondantes valent :

| $m$ (g) | 0 | 1,18 | 1,00 | 1,03 |
|---|---|---|---|---|
| θ (°C) | 24 | 51 | 72 | 89 |
| $n(HO^-)$ (mol) | 0 | 0,0295 | 0,0250 | 0,0258 |
| Quantité de matière cumulée | 0 | 0,0295 | 0,0545 | 0,0803 |

Pour la première expérience, $n_{HO^-,i} = c_B V_B$

| $V_B$ (mL) | 0 | 5,0 | 10,0 | 15,0 | 20,0 |
|---|---|---|---|---|---|
| θ (°C) | 22 | 35 | 42 | 46 | 50 |
| $n(HO^-)$ (mol) | 0 | 0,025 | 0,050 | 0,075 | 0,10 |

En réunissant les deux données sur un même graphe, on obtient :




Ce graphe montre que :

• l'addition d'ions $HO^-$ sous forme d'un solide provoque une augmentation plus grande de la température que si l'addition est sous forme d'une solution,

• l'addition d'ions $HO^-$ sous forme d'un solide provoque une augmentation affine de la température, ce qui n'est pas le cas lors de l'addition de la solution de base.

**f.** Quand on ajoute une solution, le volume augmente, il faut donc chauffer un plus grand volume de liquide et, pour le même avancement (donc la même énergie produite), l'échauffement est moindre.

**g.** Si l'ajout avait continué, la température aurait continué à augmenter et le mélange réactionnel (essentiellement de l'eau) aurait, à l'endroit de l'ajout de soude, dépassé sa température d'ébullition. Les risques de projection seraient devenus importants et l'expérience dangereuse.

**h.** Suivant les conditions opératoires, il faut prendre des précautions lors du mélange d'un acide fort et d'une base forte.

Lors d'un mélange de solutions, même de concentration élevée, l'exothermicité de la réaction n'est pas une source de danger. Pour cette raison, il sera possible de faire des titrages entre acide et base forts sans précaution spéciale. En revanche, si un mélange fait intervenir un solide, l'élévation subite de la température peut générer une ébullition ponctuelle et favoriser les projections d'acide ou de base.

D'autre part, il faut veiller à ne pas se brûler.

### *Commentaires*

• Pour obtenir un effet thermique appréciable, on a choisi des solutions très concentrées (5 mol.L$^{-1}$). Le programme (Réaction entre un acide fort et une base forte : aspect thermique de la réaction. Sécurité.) ne doit pas laisser penser que tout mélange d'acide fort et de base forte présente un risque lié à l'exothermicité de la réaction. Lors de l'utilisation de ces solutions, il existe un risque réel mais il est lié au contact avec la peau et les yeux, et non à l'exothermicité.

• Le graphe obtenu à la question **b.** n'est pas linéaire (ce qui se retrouve par le calcul). Un élève qui modéliserait ses données par une droite ferait une erreur grave. L'énergie impliquée est effectivement proportionnelle au volume ajouté, mais pas l'élévation de la température.

La raison tient au fait que le volume total de la solution qui s'échauffe n'est pas constant.

• Pour la question **d.** le graphe peut donc être considéré comme une courbe d'étalonnage. Une courbe d'étalonnage n'est pas toujours une droite.

## 3 Mesure d'une constante d'acidité (p. 360)

### *Objectif*

Le but de cette activité est de découvrir la notion de constante d'acidité $K_a$ et celle de solution tampon.

Dans un premier temps, l'élève réalise des mélanges entre une base et un acide, puis il mesure le pH de ces mélanges.

Il trace ensuite la représentation graphique du pH en fonction du rapport $\frac{[\text{base}]}{[\text{acide}]}$ puis en déduit le lien entre constante d'acidité $K_a$ et pH.

Dans un second temps, l'élève compare l'effet d'une dilution sur deux solutions afin de retrouver une des propriétés des solutions tampons.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour déterminer une constante d'acidité.

### *Liste du matériel et des produits*

**Par binôme :**

• Une burette graduée (ou une pipette jaugée de 10 mL et une de 5 mL).
• Une pipette graduée de 10 mL.
• Une coupelle de pesée.
• Une spatule.
• Quatre béchers de 100 mL.
• Deux béchers de 250 mL.
• Quatre fioles jaugées de 100 mL et leur bouchon.
• Une éprouvette graduée de 100 mL.
• Un barreau magnétique et un système d'agitation magnétique.
• Un pH-mètre étalonné et des électrodes de verre.

**Pour la classe :**

• Une balance.
• De l'acide chlorhydrique de concentration 0,010 mol.L$^{-1}$ (environ 50 mL pour 18 binômes).
• Une solution d'acide éthanoïque de concentration 1,00 mol.L$^{-1}$ (environ 540 mL pour 18 binômes).
• De l'éthanoate de sodium (environ 120 g pour 18 binômes).
• Une solution d'hydroxyde de sodium de concentration 0,10 mol.L$^{-1}$.
• Des solutions étalons pour le pH-mètre.
• De l'eau distillée.

### *Corrigé*

**1.a.** Par définition,

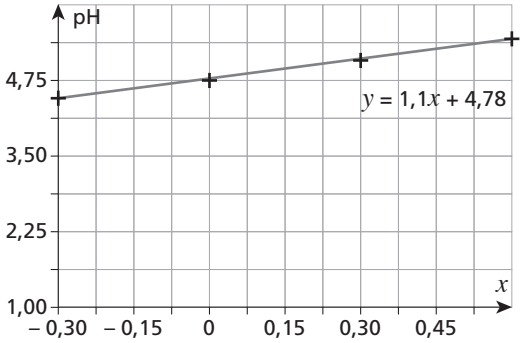
$$[\text{acide}] = \frac{n(\text{acide})}{V_T} \text{ et } [\text{base}] = \frac{n(\text{base})}{V_T}.$$

Ainsi, $\frac{[\text{base}]}{[\text{acide}]} = \frac{\frac{n(\text{base})}{V_T}}{\frac{n(\text{acide})}{V_T}} = \frac{n(\text{base})}{n(\text{acide})}$.

**b.** Les valeurs se trouvent dans le tableau suivant :

| | S1 | S2 | S3 | S4 |
|---|---|---|---|---|
| $\frac{[\text{base}]}{[\text{acide}]}$ (calculé) | 1,0 | 0,50 | 2,0 | 4,0 |
| $x = \log\left(\frac{[\text{base}]}{[\text{acide}]}\right)$ (calculé) | 0 | – 0,30 | 0,30 | 0,60 |
| **pH** (mesuré) | 4,75 | 4,47 | 5,1 | 5,45 |

On obtient le graphe suivant :




**c.** On prend le logarithme de l'expression : $K_a = \frac{[\text{base}][H_3O^+]}{[\text{acide}]}$ :

$$\log(K_a) = \log\left(\frac{[\text{base}][H_3O^+]}{[\text{acide}]}\right) = \log[H_3O^+] + \log\frac{[\text{base}]}{[\text{acide}]}$$

$$= \log[H_3O^+] + x$$

On déduit alors :

$$-\text{ pK}_a = -\text{ pH} + x \text{ soit pH} = \text{pK}_a + x.$$

La courbe obtenue est une fonction affine, d'ordonnée à l'origine égale à $pK_a$. Ainsi, $pK_a = 4,78$.

On constate que la valeur trouvée graphiquement est peu différente de la valeur tabulée à 25 °C (4,75).

**2.**

▶ Pour obtenir une solution d'acide chlorhydrique dont le pH est celui de $S_2$ (pH = 4,47) par dilution d'une solution d'acide chlorhydrique de concentration $c = 0,010$ mol.L$^{-1}$, il faut plonger l'électrode de pH dans un grand bécher d'eau distillée (environ 250 mL) équipé d'une agitation magnétique et ajouter l'acide chlorhydrique goutte à goutte jusqu'à amener le pH à la valeur attendue (environ 4 à 5 gouttes mais tout dépend de la qualité de l'eau distillée et de son pH).

Plus le volume d'eau utilisé est grand, plus il est possible d'obtenir un pH final précis.

▶ Le prélèvement de cette solution se fait avec une éprouvette graduée dont la précision est suffisante. Les 70 mL sont introduits dans un bécher muni d'une agitation magnétique.

▶ Pour augmenter le pH d'une unité de cette solution avec de la soude de concentration 0,10 mol.L$^{-1}$, il faut ajouter la base goutte à goutte, soit avec une pipette graduée de 5 mL. Une goutte suffit.

▶ Avec la solution 2, il faut 86 mL

**d.** Le volume ajouté pour obtenir une augmentation d'une unité de pH n'est pas le même pour les deux solutions.

La solution constituée d'un acide faible et de sa base conjuguée a plus résisté à la variation de pH qu'une solution d'un acide fort de même pH initial. Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu lors de l'ajout modéré d'une solution de base forte.

***Commentaires***

• La préparation des quatre solutions ne pose pas de problème même s'il s'agit de préparer une solution de volume connu en mélangeant un solide, une solution et de l'eau, ce que les élèves n'ont peut-être jamais fait.

• La relation obtenue à la question **a.** est vérifiée tant que la dilution n'est pas trop importante, car l'apport d'une grande quantité de solvant produit une dissociation de l'acide (loi de dilution d'Ostwald).

## 4 Régulation du pH dans l'organisme (p. 361)

***Objectif***

Le but de cette activité est de comprendre le principe de quelques mécanismes de régulation du pH dans l'organisme. Dans un premier temps, le rôle du dioxyde de carbone dans l'acidification du pH sanguin est étudié. Dans un second temps, le fonctionnement des reins et leur capacité à réabsorber des solutés filtrés pour réguler le pH est mis en évidence.

***Correspondance avec le programme***

Extraire et exploiter des informations pour montrer l'importance du contrôle du pH dans un milieu biologique.

***Corrigé***

**a.** Lorsqu'on élimine le dioxyde de carbone, qui est une espèce chimique acide, on augmente le pH de la solution. En effet, si la concentration [acide] diminue, alors $\log\frac{[\text{base}]}{[\text{acide}]}$ augmente et, puisque $pK_a$ est constant, le pH augmente d'après la relation $pH = pK_a + \log\frac{[\text{base}]}{[\text{acide}]}$.

**b.** Le pH du sang est très précisément de 7,4. D'après le diagramme de prédominance **(Fig. 8** p. 361**)**, on constate qu'à ce pH (et entre 6,4 et 10,3), c'est l'ion hydrogénocarbonate qui prédomine.

**c.** L'oxydation du glucose dans les cellules musculaires produit localement $CO_2$, qui est un acide, et diminue donc localement le pH :

$$C_6H_{12}O_6 + 12\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O.$$

**d.** L'organisme doit remonter le pH sanguin en éliminant le dioxyde de carbone, ce qui est possible en augmentant le rythme respiratoire.

**e.** Le pH du sang (7,4) est légèrement supérieur au $pK_a$ du couple $H_2PO_4^-/HPO_4^{2-}$ (7,2). On peut alors en déduire que ces deux ions sont en concentration quasiment identique et que l'ion $HPO_4^{2-}$ prédomine légèrement.

**f.** L'urine élimine les ions $H_2PO_4^-$ (forme acide du couple $H_2PO_4^-/HPO_4^{2-}$). L'élimination de la forme acide d'un couple conduit à l'augmentation du pH.

**g.** Le rein peut réabsorber les solutés qui ont des propriétés acido-basiques comme les ions hydrogénocarbonate $HCO_3^-$, les ions oxonium $H_3O^+$ ou les ions dihydrogénophosphate $H_2PO_4^-$.

# Exercices

## Applications

### 1 Solution de chlorure d'hydrogène

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 2 Solution d'acide sulfurique

**a.** L'équation de dissolution et de dissociation s'écrit : $H_2SO_{4(\ell)} + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_3O^+ + SO_4^{2-}$.

**b.** On dresse le tableau d'avancement suivant :

| | Avancement (mol) | $H_2SO_{4(\ell)} + 2\ H_2O \rightarrow 2\ H_3O^+ + SO_4^{2-}$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| État initial | $x = 0$ | $n$ | solvant | 0 | 0 |
| État final | $x_f$ | $n - x_f = 0$ | solvant | $2\ x_f$ | $x_f$ |

À l'état final, on a :

$n - x_f = 0$, soit $n = x_f = 1{,}5.10^{-4}$ mol.

Ainsi, $[H_3O^+] = \frac{2n}{V}$

$$[H_3O^+] = \frac{2 \times 1{,}5.10^{-4}}{0{,}100} = 3{,}0.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}$$

et $[SO_4^{2-}] = \frac{n}{V}$

$$[SO_4^{2-}] = \frac{1{,}5.10^{-4}}{0{,}100} = 1{,}5.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**c.** Le pH vaut alors : $pH = -\log[H_3O^+]$

$pH = -\log(3{,}0.10^{-3}) = 2{,}52$.

### 3 pH après dilution

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 638.*

### 4 Concentration en ions hydroxyde

**a.** D'après l'expression du produit ionique de l'eau, $K_e = [H_3O^+]\ [HO^-]$, on a : $[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]}$

$$[HO^-] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{2{,}0.10^{-4}} = 5{,}0.10^{-11}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**b.** Quand pH = 9,5, alors $[H_3O^+] = 10^{-pH}$

$[H_3O^+] = 3.10^{-10}$ mol.L$^{-1}$

et $[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]}$

$$[HO^-] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{3.10^{-10}} = 3.10^{-5}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**c.** La concentration en ions oxonium vaut :

$$[H_3O^+] = \frac{7{,}0.10^{-3}}{0{,}35} = 2{,}0.10^{-2}\ \text{mol.L}^{-1}$$

et $[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]}$

$$[HO^-] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{2{,}0.10^{-2}} = 5{,}0.10^{-13}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**d.** La concentration en ions oxonium vaut :

$$[H_3O^+] = \frac{2 \times 1{,}5.10^{-4}}{0{,}100} = 3{,}0.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}$$

et $[HO^-] = \dfrac{K_e}{[H_3O^+]}$

$[HO^-] = \dfrac{1{,}0.10^{-14}}{3{,}0.10^{-3}} = 3{,}3.10^{-12}\ \text{mol.L}^{-1}$.

### 5 Solution d'hydroxyde de sodium

**a.** L'équation de dissolution dans l'eau s'écrit :

$$NaOH_{(s)} \rightarrow Na^+_{(aq)} + HO^-_{(aq)}.$$

**b.** La dissolution de l'hydroxyde de sodium est totale. Si $n$ est la quantité de matière d'hydroxyde de sodium, alors $n_{HO^-} = n = \dfrac{m}{M}$

$n_{HO^-} = \dfrac{4{,}0.10^{-3}}{40{,}0} = 1{,}0.10^{-4}\ \text{mol}$.

La concentration en ions hydroxyde vaut alors :

$$[HO^-] = \frac{n}{V}$$

$$[HO^-] = \frac{1{,}0.10^{-4}}{0{,}100} = 1{,}0.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**c.** L'expression du produit ionique de l'eau :

$K_e = [H_3O^+]\ [HO^-]$ donne $[H_3O^+] = \dfrac{K_e}{[HO^-]}$

$[H_3O^+] = \dfrac{1{,}0.10^{-14}}{1{,}0.10^{-3}} = 1{,}0.10^{-11}\ \text{mol.L}^{-1}$.

**d.** Le pH vaut alors : $pH = -\log[H_3O^+]$

$pH = 11{,}0$.

**e.** Dans une telle solution, la phénolphtaléine serait rose car le pH est supérieur aux pH de sa zone de virage.

### 6 pH et concentrations

| | $Na^+ + HO^-$ | $H_3O^+ + Cl^-$ | $K^+ + HO^-$ |
|---|---|---|---|
| pH | 11,2 | 3,51 | 10,80 |
| $[H_3O^+]$ | $6.10^{-12}$ | $3{,}1.10^{-4}$ | $1{,}6.10^{-11}$ |
| $[HO^-]$ | $2.10^{-3}$ | $3{,}2.10^{-11}$ | $6{,}3.10^{-4}$ |
| $c$ | $2.10^{-3}$ | $3{,}2.10^{-4}$ | $6{,}3.10^{-4}$ |

*Remarque* : pour la gestion des chiffres significatifs, se reporter au paragraphe 1.2 du cours p. 362 du manuel de l'élève.

### 7 Acide sulfurique

| | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ | $S_5$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $c$ | $1{,}0.10^{-3}$ | $5{,}0.10^{-4}$ | $5{,}0.10^{-6}$ | $1{,}0.10^{-3}$ | $5.10^{-4}$ |
| $[H_3O^+]$ | $2{,}0.10^{-3}$ | $1{,}0.10^{-3}$ | $1{,}0.10^{-5}$ | $2{,}0.10^{-3}$ | $1.10^{-3}$ |
| $[HO^-]$ | $5{,}0.10^{-12}$ | $1{,}0.10^{-11}$ | $1{,}0.10^{-9}$ | $5{,}0.10^{-12}$ | $1.10^{-11}$ |
| $[SO_4^{2-}]$ | $1{,}0.10^{-3}$ | $5{,}0.10^{-4}$ | $5{,}0.10^{-6}$ | $1{,}0.10^{-3}$ | $5.10^{-4}$ |
| pH | 2,70 | 3,00 | 5,00 | 2,70 | 3,0 |

*Remarque :* pour la gestion des chiffres significatifs, se reporter au paragraphe 1.2 du cours p. 362 du manuel de l'élève.

### 8 Potasse

**a.** L'équation de dissolution dans l'eau s'écrit :

$$KOH_{(s)} \rightarrow K^+ + HO^-.$$

**b.** On dissout une base forte dans l'eau, le pH va donc augmenter et sera supérieur à 7.

**c.** La dissolution d'une mole de potasse conduit à la formation d'une mole d'ions hydroxyde.

On en déduit que $[HO^-] = c = 2{,}0.10^{-2}\ \text{mol.L}^{-1}$.

Le produit ionique $K_e = [H_3O^+]\ [HO^-]$ donne :

$$[H_3O^+] = \frac{K_e}{[HO^-]}$$

$[H_3O^+] = \dfrac{1{,}0.10^{-14}}{2{,}0.10^{-2}} = 5{,}0.10^{-13}\ \text{mol.L}^{-1}$.

**d.** Le pH vaut alors : $pH = -\log[H_3O^+]$

$pH = -\log(5{,}0.10^{-13}) = 12{,}30$.

La solution est bien basique, comme prévu par la question **b**.

### 9 Acide méthanoïque

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 639.*

### 10 Acide ascorbique

**a.** L'équilibre de Brönsted s'écrit :

$$C_6H_8O_6 \rightleftharpoons C_6H_7O_6^- + H^+.$$

**b.** La forme acide est l'acide ascorbique. La forme basique est l'ion ascorbate.

**c.** La constante d'acidité $K_a$ s'écrit :

$$K_a = \frac{[C_6H_7O_6^-][H_3O^+]}{[C_6H_8O_6]}.$$

### 11 Phénol

**a.** Le phénol a pour formule $C_6H_5OH$.

L'équilibre de Brönsted s'écrit :

$C_6H_5OH \rightleftharpoons C_6H_5O^- + H^+$.

La constante d'acidité $K_a$ s'écrit :

$$K_a = \frac{[C_6H_5O^-][H_3O^+]}{[C_6H_5OH]}.$$

**b.** Lorsque $pH = pK_a$, $K_a = [H_3O^+]$, d'où $\dfrac{[C_6H_5O^-]}{[C_6H_5OH]} = 1$.

### 12 Couple de l'acide benzoïque

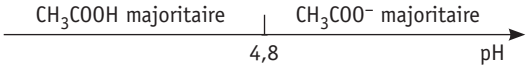
*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 639.*

### 13 Couple de l'ammoniac

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 639.*

### 14 L'acide éthanoïque

**a.** Le diagramme de prédominance est :




**b.** Puisque pH < $pK_a$, l'acide éthanoïque prédomine.

**c.** Pour que pH = $pK_a$, il faut ajouter une solution basique pour augmenter le pH de 3,2 à 4,8.

**d.** Pour pH = $pK_a$, il n'y a pas d'espèce majoritaire, l'acide et la base sont en quantité identique.

### 15 Mélange d'acide fort et de base forte

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 639.*

### 16 Dilution et mélange

**a.** Une solution d'hydroxyde de sodium contient les ions hydroxyde et sodium.

La concentration en ions hydroxyde vaut alors :

$[HO^-] = c = 5{,}0.10^{-4}$ mol.L$^{-1}$.

Le produit ionique de l'eau $K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$ donne :

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{K_e}{\left[HO^-\right]}$$

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{5{,}0.10^{-4}} = 2{,}0.10^{-11}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

D'où pH = $-\log[H_3O^+]$ soit :

pH = $-\log(2{,}0.10^{-11}) = 10{,}70$.

**b.** La dilution au dixième implique que $\left[HO^-\right] = \frac{c}{10}$

$[HO^-] = 5{,}0.10^{-5}$ mol.L$^{-1}$.

Dans ce cas, $\left[H_3O^+\right] = \frac{K_e}{\left[HO^-\right]}$

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{5{,}0.10^{-5}} = 2{,}0.10^{-10}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

D'où pH = $-\log[H_3O^+]$ soit :

pH = $-\log(2{,}0.10^{-10}) = 9{,}70$.

**c.** L'équation de la réaction s'écrit :

$$H_3O^+ + HO^- \rightarrow 2\ H_2O.$$

**d.** La réaction se fait mole à mole.

L'ion hydroxyde est en excès et $n_r = n - n''$

$n_r = 5{,}0.10^{-4} - 3{,}0.10^{-4} = 2{,}0.10^{-4}$ mol.

La solution finale a un volume total $V$ égal à 1,00 L.

La concentration en ions hydroxyde $HO^-$ vaut alors :

$$\left[HO^-\right] = \frac{n_r}{V}$$

$$\left[HO^-\right] = \frac{2{,}0.10^{-4}}{1{,}00} = 2{,}0.10^{-4}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

Le produit ionique de l'eau $K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$ donne :

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{K_e}{\left[HO^-\right]}$$

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{2{,}0.10^{-4}} = 5{,}0.10^{-11}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

Par définition, pH = $-\log[H_3O^+]$

pH = $-\log(5{,}0.10^{-11}) = 10{,}30$.

**e.** Avec la solution S', ce sont les ions oxonium qui sont en excès. Dans ce cas, $n'_r = n'' - n'$

$n'_r = 3{,}0.10^{-4} - 5{,}0.10^{-5} = 2{,}5.10^{-4}$ mol.

La solution finale a un volume total $V$ égal à 1,00 L.

La concentration en ions oxonium $H_3O^+$ vaut alors :

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{n'_r}{V}$$

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{2{,}5.10^{-4}}{1{,}00} = 2{,}5.10^{-4}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

Par définition, pH = $-\log[H_3O^+]$ soit pH = 3,60.

## Entraînement

### 17 Eau de Javel

**a.** L'ion hypochlorite a perdu un ion $H^+$ par rapport à l'acide hypochloreux. Celui-ci a pour formule HClO.

L'équilibre de Brönsted de ce couple est :

$$HClO \rightleftharpoons ClO^- + H^+.$$

L'équation de la réaction de l'acide hypochloreux avec l'eau s'obtient en combinant l'équilibre précédent avec :

$$H_2O + H^+ \rightleftharpoons H_3O^+$$

soit $HClO + H_2O \rightleftharpoons ClO^- + H_3O^+$.

**b.** Le diagramme de prédominance est :

**c.** Dans l'eau de Javel, pH = 11 et pH > $pK_a$ : l'ion hypochlorite est la forme prédominante.

### 18 Solution d'acide butanoïque

**a.** L'équilibre de Brönsted de ce couple s'écrit :

$$C_3H_7CO_2H \rightleftharpoons C_3H_7CO_2^- + H^+.$$

L'équation de réaction de l'acide butanoïque avec l'eau s'écrit :

$$C_3H_7CO_2H + H_2O \rightleftharpoons C_3H_7CO_2^- + H_3O^+.$$

**b.** Par définition, $K_a = \frac{\left[C_3H_7CO_2^-\right]\left[H_3O^+\right]}{\left[C_3H_7CO_2H\right]}$

$K_a = 2{,}5 \times 10^{-5{,}20} = 1{,}6.10^{-5}$

$pK_a = -\log K_a$

$pK_a = 4{,}8$.

**c.** Puisque pH = 5,20, alors $[H_3O^+] = 10^{-pH}$

$[H_3O^+] = 6{,}3.10^{-6}$ mol.L$^{-1}$.

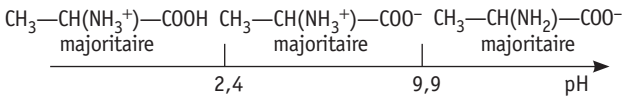
Le produit ionique de l'eau s'écrit $K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$, d'où $\left[HO^-\right] = \frac{K_e}{\left[H_3O^+\right]}$

$$\left[HO^-\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{6{,}3.10^{-6}} = 1{,}6.10^{-9}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

### 19 Acides aminés

**a.** Les formes sont : $CH_3—CH(NH_3^+)—COOH$, $CH_3—CH(NH_3^+)—COO^-$ et $CH_3—CH(NH_2)—COO^-$.

**b.** Le diagramme de prédominance est :




**c.** Pour pH = 6,1, le diagramme montre que $CH_3—CH(NH_3^+)—COO^-$ prédomine.

C'est effectivement le zwitterion.

**d.** Pour que le pH passe de 6,1 à 9,9, il faut ajouter une solution basique.

**e.** Pour $pH = pK_{a2}$, les formes $CH_3—CH(NH_3^+)—COO^-$ et $CH_3—CH(NH_2)—COO^-$ sont en quantité identique, comme le montre le diagramme.

## Approfondissement

### 20 Produits ioniques

**1.a.** L'eau pure contient les ions hydroxyde $HO^-$ et oxonium $H_3O^+$.

D'après l'équilibre d'autoprotolyse de l'eau, $2\ H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + HO^-$, il se forme autant d'ions oxonium que d'ions hydroxyde.

**b.** Le produit ionique de l'eau $K_e$ s'écrit :

$$K_e = [H_3O^+]\ [HO^-].$$

Puisque $[H_3O^+] = [HO^-]$, $K_e = [H_3O^+]^2$ soit :

$$[H_3O^+] = \sqrt{K_e}$$

$$[H_3O^+] = \sqrt{1{,}0.10^{-14}} = 1{,}0.10^{-7}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**2. a.** L'équation chimique de l'énoncé fait apparaître les couples $CH_3OH/CH_3O^-$ et $CH_3OH_2^+/CH_3OH$.

**b.** Le méthanol, tout comme l'eau, réagit sur lui-même pour former $CH_3OH_2^+$ et $CH_3O^-$.

**c.** Par analogie avec la question **1.b.**, on a : $K_m = [CH_3OH_2^+]\ [CH_3O^-]$

**d.** Dans le méthanol pur, il se forme des ions $CH_3OH_2^+$ et $CH_3O^-$ en quantité égale, d'après l'équation de l'énoncé.

**e.** De même, puisque $[CH_3OH_2^+] = [CH_3O^-]$, $K_m = [CH_3OH_2^+]^2$ soit $[CH_3OH_2^+] = \sqrt{K_m}$

$[CH_3OH_2^+] = 5.10^{-9}\ \text{mol.L}^{-1}$.

**f.** Le $pH_m$ du méthanol pur vaut donc :

$pH_m = -\log[CH_3OH_2^+]$

$pH_m = 8{,}4$.

## Exercices de BAC

### 21 Chlorure d'hydroxylammonium

**1.a.** Au sens de Brönsted, une base est une entité chimique déduite à partir de la forme acide (donnée dans l'énoncé) à laquelle on enlève un proton $H^+$. L'hydroxylammine a donc pour formule $NH_2OH$.

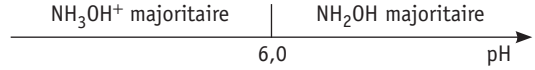
**b.** L'équilibre de Brönsted de ce couple est :

$$NH_3OH^+ \rightleftharpoons NH_2OH + H^+.$$

**c.** L'équation de la réaction entre l'ion hydroxylammonium et l'eau est :

$$NH_3OH^+ + H_2O \rightleftharpoons NH_2OH + H_3O^+.$$

**d.** On trace le diagramme de prédominance suivant :




**2.a.** Par définition, $pH = -\log[H_3O^+]$ soit :

$[H_3O^+] = 10^{-pH} = 10^{-3,8} = 2.10^{-4}\ \text{mol.L}^{-1}$.

**b.** Par définition, $K_e = [H_3O^+]\ [HO^-]$. On en déduit :

$$[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]} = \frac{1{,}0.10^{-14}}{10^{-3,8}} = 6.10^{-11}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

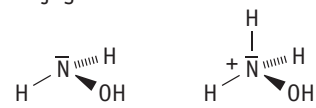
**c.** Par définition : $K_a = \dfrac{[NH_2OH][H_3O^+]}{[NH_3OH^+]}$.

$$\frac{[NH_3OH^+]}{[NH_2OH]} = \frac{[H_3O^+]}{K_a} = 10^{-(pH-pK_a)}$$

$$\frac{[NH_3OH^+]}{[NH_2OH]} = 10^{-(3,8-6,00)} = 2.10^2.$$

L'ion hydroxylammonium prédomine dans la solution S.

*Remarque* : la structure de l'hydroxylamine et de son acide conjugué sont :



### 22 Étude d'un produit ménager

**1.a.** Une base selon Brönsted est une espèce chimique capable de capter un proton $H^+$. L'ion ammonium possède un $H^+$ de plus que l'ammoniac. Sa formule est donc $NH_4^+$.

**b.** L'équilibre de Brönsted de ce couple est :

$$NH_4^+ \rightleftharpoons NH_3 + H^+.$$

**c.** L'équation de la réaction entre l'ion ammonium et l'eau est : $NH_4^+ + H_2O \rightleftharpoons NH_3 + H_3O^+$.

**d.** La constante d'acidité du couple a pour expression : $K_a = \dfrac{[NH_3][H_3O^+]}{[NH_4^+]}$.

**2.a.** Par définition, la concentration de la solution est :

$$c = \frac{n}{V} = \frac{2{,}5.10^{-3}}{0{,}250} = 1{,}0.10^{-2}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**b.** Par définition, pH $= -\log[H_3O^+]$ soit $[H_3O^+] = 10^{-pH}$
$[H_3O^+] = 10^{-10{,}60} = 2{,}5.10^{-11}$ mol.L$^{-1}$.

**c.** Le produit ionique de l'eau a pour expression : $K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$. Ainsi, on a $\left[HO^-\right] = \dfrac{K_e}{\left[H_3O^+\right]}$

$$\left[HO^-\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{10^{-10{,}60}} = 4{,}0.10^{-4}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**d.** À partir de l'expression de la constante d'acidité, on a $\dfrac{K_a}{\left[H_3O^+\right]} = \dfrac{\left[NH_3\right]}{\left[NH_4^+\right]}$.

Avec $K_a = 5{,}6.10^{-10}$, $\dfrac{\left[NH_3\right]}{\left[NH_4^+\right]} = \dfrac{5{,}6.10^{-10}}{10^{-10{,}60}} = 22$.

**e.** Puisque $[NH_3] + [NH_4^+] = c$
et que $[NH_3] = 22\,[NH_4^+]$,
on a : $22\,[NH_4^+] + [NH_4^+] = c$ soit $23\,[NH_4^+] = c$
et $\left[NH_4^+\right] = \dfrac{c}{23}$

$$\left[NH_4^+\right] = \frac{1{,}0.10^{-2}}{23} = 4{,}3.10^{-4}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

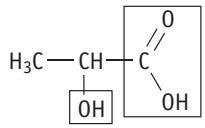
$$\left[NH_3\right] = 22\left[NH_4^+\right] = \frac{22c}{23}$$

$$\left[NH_3\right] = \frac{22 \times 1{,}0.10^{-2}}{23} = 9{,}6.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**f.** Pour l'équation de l'énoncé, l'avancement $x$ correspond à la quantité de matière d'ions ammonium formée. Sachant que le volume de solution est égal à 250 mL, on en déduit que $x = [NH_4^+]\,V$
$x = 4{,}3.10^{-4} \times 0{,}250 = 1{,}1.10^{-4}$ mol.

## 23 Détartrant à base d'acide lactique

**1.** On reconnaît le groupement hydroxyle OH et le groupement acide carboxylique COOH.




**2.a.** L'acide lactique est un acide faible puisqu'il possède une constante d'acidité, associée à sa réaction d'équilibre avec l'eau.

**b.** L'équation de la réaction de l'acide lactique avec l'eau s'écrit : $C_3H_6O_3 + H_2O \rightleftharpoons C_3H_5O_3^- + H_3O^+$.

**3.a.** La constante d'acidité $K_a$ de l'acide lactique a pour expression : $K_a = \dfrac{\left[H_3O^+\right]\left[C_3H_5O_3^-\right]}{\left[C_3H_6O_3\right]}$.

**b.** On en déduit que $\dfrac{\left[C_3H_5O_3^-\right]}{\left[C_3H_6O_3\right]} = \dfrac{K_a}{\left[H_3O^+\right]}$

$$\frac{\left[C_3H_5O_3^-\right]}{\left[C_3H_6O_3\right]} = \frac{1{,}3.10^{-4}}{10^{-1{,}90}} = 0{,}010.$$

**c.** On a le diagramme de prédominance suivant avec $pK_a = 3{,}9$ :

À pH = 1,9 (< $pK_a$), on se trouve dans le domaine de prédominance de l'acide AH.

**4.a.** La réaction de détartrage est une réaction acido-basique car elle fait apparaître un transfert d'ion $H^+$ entre la forme acide du couple acide lactique/ion lactate et la forme basique du couple ion carbonate/ion hydrogénocarbonate.

**b.** Les éléments chimiques constituant le tartre sont éliminés sous forme de gaz (dioxyde de carbone) et de lactate de calcium.

## 24 Les couleurs du bleu de bromothymol

**1.a.** L'équation de la réaction de l'acide $BBTH^+$ avec l'eau s'écrit : $BBTH^+ + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + BBT$.

**b.** Par définition, $K_a = \dfrac{\left[H_3O^+\right][BBT]}{\left[BBTH^+\right]}$.

**c.** Quand $[BBTH^+] = [BBT]$, $K_a = [H_3O^+]$ et pH $= pK_a$.

**2.a.** Graphiquement, on lit $\lambda_0 = 620$ nm.

**b.** La couleur absorbée est l'orangé (la correspondance entre la longueur d'onde et la couleur est donnée dans le triangle des couleurs en rabat de couverture).

**c.** À l'aide du triangle chromatique, la couleur de la solution correspond à la couleur opposée à l'orangé, soit le bleu.

**d.** Si on veut que seule la forme basique absorbe, il faut se placer dans une zone où l'absorbance de la forme acide est nulle. En se plaçant pour $\lambda_0 = 620$ nm, la forme acide n'absorbe pas.

**3.a.** Dans chaque solution, on a une quantité de matière en bleu de bromothymol égale à : $n_{BBT} = c_0 V_0$

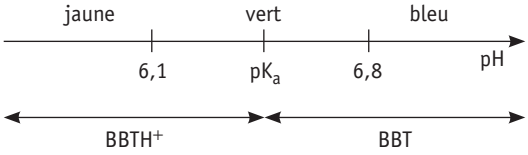
$$n_{BBT} = 3{,}0.10^{-4}\ \text{mol.}$$

Dans chaque solution, le volume total est $V_T = 11{,}0$ mL. La concentration en bleu de bromothymol dans chaque solution se calcule à l'aide du facteur de dilution $f = \dfrac{V_0}{V_T}$. Elle vaut alors : $c = c_0 f$

$$c = 3{,}40.10^{-4} \times \frac{1{,}0}{11{,}0} = 2{,}7.10^{-5}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**b.** Puisque seule la forme basique absorbe à $\lambda_0$, on en déduit que l'absorbance $A$ est due à la forme basique, soit $A = A_{BBT}$.

**c.** Le diagramme de prédominance du bleu de bromothymol est :




**d.** La solution change de teinte entre pH = 6,1 et pH = 8,8. Elle passe du jaune au bleu (voir tableau de l'énoncé). Sachant que seule la forme basique absorbe à $\lambda_0$, l'absorbance augmente donc au fur et à mesure du changement de teinte. Une fois que la solution est bleue, celle-ci conserve une absorbance constante et maximale pour pH > 8,7 puisque la forme bleue a une concentration égale à $c$.

**e.** À l'aide de la relation $A = A_{BBTH^+} + A_{BBT}$ de l'énoncé et vu que pour $\lambda_0$, $A_{BBTH^+} = 0$, on a :
$A_{max} = k[BBT]_{max} = kc$.

**f.** La zone de virage correspond au passage de la couleur jaune à la couleur bleue, soit la zone de pH pour laquelle la solution est verte. On en déduit alors que le pK$_a$ se trouve entre 6,7 et 7,6.

**g.** D'après la question **1.c.**, le pK$_a$ est égal au pH quand [BBTH$^+$] = [BBT]. Sur le graphe, cette condition est remplie quand les courbes rose et verte se croisent, soit pour pH = 7,2. On en déduit que pK$_a$ = 7,2.

## 25 L'eau distillée et son pH

**I.1.** La réaction d'autoprotolyse de l'eau s'écrit :

$$2H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + HO^-$$

**2.** Le produit ionique de l'eau a pour expression :

$$K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$$

**3.a.** Dans l'eau pure :
$[H_3O^+] = [HO^-] = 1{,}0.10^{-7}$ mol.L$^{-1}$.
Ainsi, $K_e = 1{,}0.10^{-7} \times 1{,}0.10^{-7} = 1{,}0.10^{-14}$.

**b.** pH = – log[$H_3O^+$]
pH = – log($1{,}0.10^{-7}$) = 7,00.

**II.1.** L'équation de la réaction s'écrit :

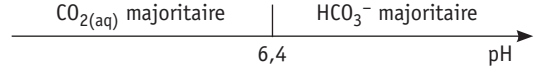
$$CO_{2(aq)} + H_2O_{(l)} \rightleftharpoons HCO_3^-{}_{(aq)} + H_3O^+.$$

Les couples mis en jeu dans cette équation sont $CO_{2(aq)}/HCO_3^-$ et $H_3O^+/H_2O$.

**2.** La constante d'acidité $K_a$ s'écrit :

$$K_a = \frac{[HCO_3^-][H_3O^+]}{[CO_{2(aq)}]}.$$

**3.** Le diagramme de prédominance du couple $CO_{2(aq)}/HCO_3^-$ est :




Le pH de l'eau distillée est de 5,7. On voit que pH < pK$_a$ : c'est donc l'espèce acide du couple qui prédomine, à savoir $CO_{2(aq)}$.

**4.a.** À pH = 5,70, on a pH = – log[$H_3O^+$] soit $[H_3O^+] = 10^{-pH}$
$[H_3O^+] = 10^{-5,70} = 2{,}0.10^{-6}$ mol.L$^{-1}$.
Le produit ionique de l'eau a pour expression $K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$. Ainsi, on a $[HO^-] = \frac{K_e}{[H_3O^+]}$
$[HO^-] = 5{,}0.10^{-9}$ mol.L$^{-1}$.

**b.** À l'aide de l'énoncé, on obtient :
$[HCO_3^-] = [H_3O^+] - [HO^-]$
$[HCO_3^-] = 2{,}0.10^{-6} - 5{,}0.10^{-9} = 2{,}0.10^{-6}$ mol.L$^{-1}$.

**c.** Puisque $K_a = \frac{[HCO_3^-][H_3O^+]}{[CO_{2(aq)}]}$
alors $[CO_{2(aq)}] = \frac{[HCO_3^-][H_3O^+]}{K_a}$.

$$[CO_{2(aq)}] = \frac{2{,}0.10^{-6} \times 2{,}0.10^{-6}}{10^{-6,37}} = 9{,}4.10^{-6}\,\text{mol.L}^{-1}.$$

**d.** $c = [CO_{2(aq)}] + [HCO_3^-]$
$c = 9{,}4.10^{-6} + 2{,}0.10^{-6} = 1{,}14.10^{-5}$ mol.L$^{-1}$.

**III.1.** $[CO_{2(aq)}] = k\,p$
$[CO_{2(aq)}] = 3{,}4.10^{-4} \times 0{,}038.10^{-2} = 1{,}3.10^{-5}$ mol.L$^{-1}$.

**2.** On a précédemment trouvé :

$$[CO_{2(aq)}] = 1{,}14.10^{-5}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

Cette valeur est plus faible que celle de la question **1.** On en déduit que le pourcentage en dioxyde de carbone est plus petit que 0,038 %.

## 26 Aïe ! J'ai une crampe

**1.a.** Par définition, $K_{a1} = \frac{[HCO_3^-][H_3O^+]}{[CO_{2(aq)}]}$. En isolant $[H_3O^+]$, on a :

$$[H_3O^+]_f = K_{a1}\frac{[CO_{2(aq)}]}{[HCO_3^-]}$$

soit $$pH = pK_{a1} + \log\left(\frac{[HCO_3^-]}{[CO_{2(aq)}]}\right).$$

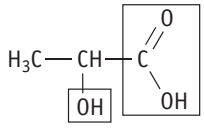
**b.** Dans le sang, $\frac{[HCO_3^-]}{[CO_{2(aq)}]} = 10^{pH-pK_a}$

$$\frac{[HCO_3^-]}{[CO_{2(aq)}]} = 10^{7,4-6,1} = 2.10^1.$$

**c.** Si le pH diminue, alors le rapport $\frac{[HCO_3^-]}{[CO_{2(aq)}]}$ doit aussi diminuer. La concentration en dioxyde de carbone augmente donc.

**d.** La respiration permet d'éliminer le dioxyde de carbone et donc de diminuer sa concentration dans le sang. De ce fait, $\frac{[HCO_3^-]}{[CO_{2(aq)}]}$ augmente et $pH = pK_{a1} + \log\left(\frac{[HCO_3^-]}{[CO_{2(aq)}]}\right)$ augmente jusqu'à sa valeur normale.

**2.a.** L'acide lactique a pour formule développée :




**b.** On reconnaît le groupement hydroxyle OH et le groupement acide carboxylique COOH.

**c.** L'équilibre de Brönsted s'écrit :
$CH_3—CHOH—COOH \rightleftharpoons CH_3—CHOH—COO^- + H^+$.

**d.** L'équation de la réaction de l'acide lactique avec l'eau s'écrit :

$$C_3H_6O_3 + H_2O \rightleftharpoons C_3H_5O_3^- + H_3O^+.$$

**e.** L'acide lactique réagit avec l'eau et libère des ions $H^+$ qui acidifient le sang, ce qui cause des crampes.

### 27 Effets thermiques d'une réaction acido-basique

**1.a.** L'équation de dissolution s'écrit :

$$HCl_{(g)} + H_2O \rightarrow H_3O^+ + Cl^-_{(aq)}.$$

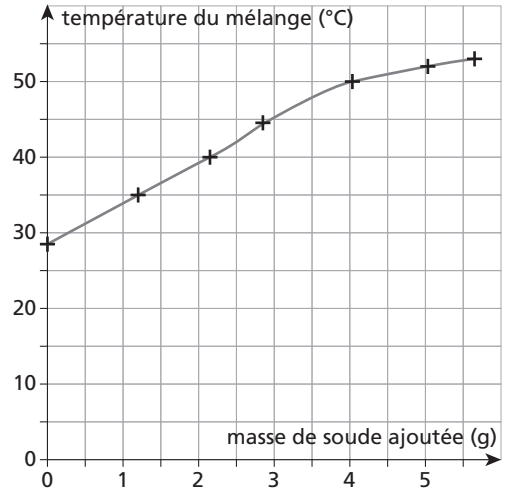
**b.** L'acide chlorhydrique est un acide fort car il résulte de la dissociation totale de HCl dans l'eau.
Par définition, $pH = -\log[H_3O^+]$ soit $pH = -\log c_A$
$pH = -\log(0{,}010) = 2{,}00$.

**c.** L'ion hydroxyde est une base forte :

$$[HO^-] = c_B = 0{,}010 \text{ mol.L}^{-1}.$$

Le produit ionique de l'eau a pour expression :
$K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$. Ainsi, on a : $[H_3O^+] = \frac{K_e}{[HO^-]}$
$[H_3O^+] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{0{,}010} = 1{,}0.10^{-12} \text{ mol.L}^{-1}$.
Le pH de la solution est donné par $pH = -\log[H_3O^+]$
$pH = -\log(1{,}0.10^{-12}) = 12{,}00$.

**2.a.** On obtient le graphe suivant :




**b.** Il s'agit de la réaction entre un acide fort et une base forte : $H_3O^+ + HO^- \rightarrow 2\ H_2O$.

**c.** Cette évolution de température montre le caractère exothermique de la réaction.

**d.** On constate que la température est plus élevée pour des masses identiques.

**e.** L'énergie thermique produite est la même car les quantités de matière mises en jeu sont identiques entre les deux expériences.

**f.** La dilution diffère entre les deux expériences et le volume de liquide est plus important dans la première expérience. Ainsi, malgré une énergie thermique identique, le volume à échauffer est plus important dans la première expérience et l'échauffement est moindre.

**g.** La dilution des réactifs est le paramètre à prendre en compte pour prévoir le danger potentiel d'une telle réaction.

## Rédiger une synthèse de documents

### 28 Acide et base au grand bain

*Analyse de la question*

La synthèse demande d'expliciter les propriétés physiques et chimiques des produits utilisés pour l'entretien des piscines privées. L'accent doit être mis sur les risques liés à leur stockage ainsi que lors d'une utilisation accidentelle. Les produits pour piscine doivent être comparés à d'autres acides courants.

| | Produit pH-plus ® | Produit pH-moins ® |
|---|---|---|
| **Propriétés chimiques** | • contient du **carbonate de sodium $Na_2CO_3$** ;<br>• **composé basique** ;<br>• irritant. | • contient de **l'hydrogénosulfate de sodium $NaHSO_4$** ;<br>• **composé acide car dans l'eau, il produit des ions $H_3O^+$ (voir l'équation chimique donnée dans le premier document)** ;<br>• irritant. |
| **Propriétés physiques** | Solide (le document indique qu'ils sont vendus en granulés). | |
| **Stockage** | **Pas de consigne particulière donc les produits sont stockés dans les récipients dans lesquels ils sont vendus.** | |
| **Modification du pH** | $Na_2CO_3 \rightarrow 2Na^+ + CO_3^{2-}$<br>$CO_3^{2-} + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 2HO^-$<br>**Libération d'ions hydroxyde, donc augmentation du pH.** | $NaHSO_4 + H_2O \rightarrow Na^+ + H_3O^+ + SO_4^{2-}$<br>**Libération d'ions oxonium, donc diminution du pH.** |

Les **acides vendus dans le commerce** sont les **acides sulfurique, nitrique, chlorhydrique, etc.** Ils sont **liquides (ou en solution)**. Le stockage et l'utilisation d'un liquide sont plus risqués que ceux d'un solide (s'il se **renverse**, il est **difficile de le récupérer** par exemple). De plus, comme tous les liquides et solutions, ces liquides **dégagent des vapeurs** qui sont d'autant plus corrosives qu'elles sont acides.

**Il est plus commode de stocker et d'utiliser le pH-moins®, qui est un solide, que les acides commerciaux qui sont liquides.**

Les **bases commerciales (ammoniac, soude, potasse)** sont **corrosives**, comme il est précisé dans le document. Le pH-plus® est le carbonate de sodium et son **caractère basique est dû aux ions carbonate** qu'il contient (voir l'équation chimique). Les ions carbonate sont **moins corrosifs** que les bases commerciales **puisqu'ils existent dans le calcaire, naturellement présent sur Terre.**

**Comme pour son équivalent acide pH-moins®, l'usage du pH-plus ® est commode et peu risqué.**

Chapitre 15

# Bilans thermiques

## Introduction au chapitre (p. 380)

Ce chapitre s'insère dans la partie *Comprendre*.

Il s'appuie sur des connaissances antérieures (nombre d'Avogadro, ordre de grandeur, approche énergétique de première S) pour mettre en place le principe d'un bilan énergétique, plus particulièrement appliqué au bilan thermique.

Les activités proposées utilisent aussi bien les outils de la recherche fondamentale (microscope à force atomique) que les objets du quotidien (bouilloire et voiture hybride).

Ce chapitre est également un préalable au chapitre 17 : « Enjeux énergétiques et chimie durable. »

## Activités

### 1 Le microscope à force atomique (p. 382)

***Objectif***

L'objectif de cette activité est de décrire un dispositif expérimental permettant la visualisation d'atomes et de molécules, de découvrir les contraintes liées au domaine microscopique et d'aborder une utilisation possible de ce dispositif.

***Correspondance avec le programme***

Extraire et exploiter des informations sur un dispositif expérimental permettant de visualiser les atomes et les molécules.

***Corrigé***

**a.** La pointe est soumise :
- à la force exercée sur elle par le levier,
- à la force exercée par la surface avec laquelle elle est en contact.

**b.** Avec la définition du document, on estime la largeur de la base de la pointe à 5 µm et la longueur de cette pointe à 5 µm aussi.

**c.** La largeur de l'extrémité de la pointe est :
$100 \times 2{,}4.10^{2} = 2{,}4.10^{4}$ pm $= 2{,}3.10^{1}$ nm.

**d.** Les dimensions des objets étudiés par l'AFM entrent aussi en jeu dans la précision de la localisation : si la pointe de l'AFM est plus large qu'une des dimensions de l'objet (sa largeur, par exemple) il ne sera pas possible d'accéder à une image de qualité de cet objet.

**e.** L'ordre de grandeur de la largeur du brin d'ADN est 10 nm soit $10^{-8}$ m. C'est le même ordre de grandeur que l'extrémité de la pointe ($10^{-8}$ m) ce qui ne permet pas une mesure de qualité ; il faudrait une pointe dont l'ordre de grandeur de la largeur soit inférieure à l'ordre de grandeur des dimensions des objets à étudier.

**LIEN UTILE**

http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosnano/glossaire/mot/afmPlus.htm

### 2 Chaîne énergétique d'un moteur hybride (p. 383)

***Objectif***

L'objectif de cette activité est d'étudier une chaîne énergétique concernant une technologie qui tend à se développer : les moteurs hybrides. Au cours de cette activité les élèves sont amenés à manipuler certaines données *a priori* inconnues d'eux mais exploitables par une bonne interprétation des unités.

Les valeurs données sont issues de fiches techniques de constructeurs.

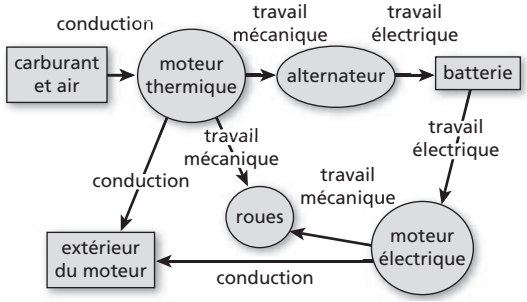
***Correspondance avec le programme***

Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.

***Corrigé***

**a.** Les encadrés rectangulaires sont des réservoirs d'énergie, les encadrés ronds sont des convertisseurs d'énergie.

**b.**




**c.** La puissance maximale fournie par le mélange air/carburant est obtenue en divisant la puissance utile fournie par le moteur thermique par le rendement soit $\frac{120}{0,3} = 4,0.10^2$ kW.

Énergie fournie = volume × densité du gazole × pouvoir énergétique du gazole

$= 50 \times 0,83 \times 42,6 = 1,8.10^3$ MJ

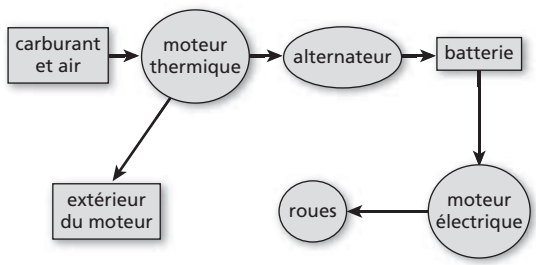
Énergie fournie = puissance fournie × durée d'utilisation

donc durée d'utilisation $= \frac{1,8 \times 10^9}{4,0 \times 10^5} = 4,5.10^3$ s

soit 1 h 15 min environ.

**d.** Les batteries renferment une énergie de 1,3 kWh. La puissance fournie par les batteries est de $\frac{20}{0,80} = 25$ kW, le rendement étant de 80 % donc la durée d'utilisation à puissance maximale est de, $\frac{1,3.10^3}{25.10^3} = 5,2.10^{-2}$ h soit environ 3 min.

**e.**




**LIEN UTILE**

http://www.lavoiturehybride.com/

## 3 Capacité thermique et rendement (p. 384)

***Objectif***

Cette activité expérimentale est l'occasion d'aborder, sur le plan pratique, les questions développées dans ce chapitre. Aucune compétence expérimentale ne figure au programme, mais il nous paraissait important d'effectuer tout de même quelques manipulations simples et néanmoins riches, dans le prolongement de ce qui est fait en Première S.

La première partie de cette activité nécessite un calorimètre (ou à défaut une bouteille thermos, les résultats avec des thermos du commerce sont très concluants pour un prix plus faible), un thermomètre (un thermomètre numérique peut être judicieux si l'étalonnage est bon ; le vérifier à l'avance). Les capacités thermiques des thermos sont assez faibles, voire négligeables pour des écarts de températures assez faibles (20 °C, par exemple) mais plus faciles à mesurer pour des grands écarts (60 °C, par exemple).

La seconde partie détermine le rendement d'une bouilloire ; elle peut aussi se faire avec un bain-marie, par exemple. Pour mesurer l'énergie consommée, l'utilisation d'un compteur d'énergie vendu dans les magasins de bricolage est une possibilité. Lors de son utilisation, on constate des régimes transitoires sur les premières secondes de la mise en route de la bouilloire et sur les dernières secondes juste après avoir arrêté la bouilloire. Ce constat doit permettre de réfléchir à la précision mesures. Par exemple, lorsqu'il est indiqué 2 000 W sur une bouilloire, il est préférable de se contenter de $2,0.10^3$ W. Faute de compteur, se référer à l'indication de puissance nominale sur la bouilloire. Néanmoins, avoir au moins un compteur d'énergie permet de vérifier cette indication souvent très peu précise.

***Correspondance avec le programme***

- Connaître et exploiter la relation entre la variation d'énergie interne et la variation de température pour un corps dans un état condensé.
- Établir un bilan énergétique faisant intervenir transfert thermique et travail.

***Corrigé***

**a.** Soit $m_{eau}$ = 500 g (masse de 500 mL d'eau).
Exemples de valeurs expérimentales :
$T_1$ = 20,2 °C, $T_2$ = 65,8 °C, $T_3$ = 41,9 °C.
On distingue trois systèmes :
• système {eau froide} dont la variation d'énergie interne vaut :

$$Q_1 = m_{eau}\, c_{eau}\, (T_3 - T_1)$$
$$= 0{,}500 \times 4{,}18.10^3 \times (41{,}9 - 20{,}2)$$
$$= 4{,}54.10^4 \text{ J} > 0$$

• système {eau chaude} dont la variation d'énergie interne vaut :

$$Q_2 = m_{eau}\, c_{eau}\, (T_3 - T_2)$$
$$= 0{,}500 \times 4{,}18.10^3 \times (41{,}9 - 65{,}8)$$
$$= -\,5{,}00.10^4 \text{ J} < 0$$

• système {calorimètre} dont la variation d'énergie interne vaut $Q_3 = C_{cal} \times (T_3 - T_1) > 0$
L'ensemble constitué du calorimètre et de son contenu étant isolé, on peut écrire :

$$Q_1 + Q_2 + Q_2 = 0$$

Ce qui donne $C_{cal} \times (T_3 - T_1) + Q_1 + Q_2 = 0$ soit

$$C_{cal} = \frac{-\,Q_1 - Q_2}{T_3 - T_1} = \frac{-\,4{,}54.10^4 + 5{,}00.10^4}{41{,}9 - 20{,}1}$$
$$= 211 \text{ J.K}^{-1}$$

**b.** Les quantités d'eau chaude et d'eau froide étant identiques, si le calorimètre ne participe pas aux échanges (ou de manière négligeable), la température finale est la moyenne des températures initiales des eaux soit $T_3 = \frac{T_1 + T_2}{2}$ soit avec les valeurs données ci-dessus $T_3 = \frac{20{,}2 + 65{,}8}{2} = 43$ °C.

**c.** Cet écart de 1 °C environ avec la valeur mesurée expérimentalement est assez faible sachant que certaines enceintes sont parfois plus performantes donc ont une capacité thermique plus faible que celle calculée ici. On voit l'intérêt d'une mesure précise des températures et d'un écart de températures important pour pouvoir déterminer $C_{cal}$ : en effet, la température calculée en négligeant la participation du calorimètre est d'autant plus proche de celle mesurée que l'écart de température entre $T_1$ et $T_2$ et faible.
Il est possible, par exemple, d'imposer des écarts de températures différents aux binômes pour pointer cette influence.

**d.** Le rendement est déterminé en divisant la variation de l'énergie interne de l'eau par l'énergie électrique consommée.

$r = \frac{mc_{eau}\Delta T}{P\Delta t}$ avec $\Delta t$ la durée de fonctionnement de la bouilloire et $P$ sa puissance.
Exemples de valeurs expérimentales :
$P = 2{,}0.10^3$ W et $\Delta t$ = 2 min 40 s soit 160 s
$m$ = 1,00 kg (masse de 1,00 L d'eau) et $T_i$ = 20,5 °C
$T_f$ = 76,8 °C soit $\Delta T = T_f - T_i$ = 56,3 °C

$$r = \frac{1{,}00 \times 4{,}18.10^3 \times 56{,}3}{2{,}0.10^3 \times 160} = 0{,}74$$

**e.** L'énergie non récupérée par l'eau peut avoir été récupérée :
• par la bouilloire elle-même (il suffit de poser la main sur ses parois pour constater que le récipient a vu sa température s'élever de manière importante),
• par l'air à la fois présent dans la bouilloire mais aussi l'air extérieur car il y a une ouverture qui en général ne peut pas être totalement obstruée.
Le récipient est le principal responsable des pertes énergétiques. Sa capacité calorifique massique est non négligeable. Mais si une bouilloire possédant une ouverture vers l'extérieur importante est utilisée, il est possible que les échanges avec l'extérieur (air) deviennent aussi très importants.

## Exercices

### Applications

**1** **La tour Eiffel en ordres de grandeurs**

**a.** $10^4$ t donc $10^7$ kg
**b.** $10^4$ **c.** $10^6$
**d.** $10^2$ m **e.** $10^5$ m$^2$

**2** **Ordres de grandeurs**

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 630.*

**3** **Déterminer un ordre de grandeur**

**a.** $10^2$ m$^3$ (soit 10 m × 5 m × 2,5 m)
**b.** $10^1$ g.mol$^{-1}$
**c.** l'ordre de grandeur de la masse volumique de l'air est $10^0$ kg.m$^{-3}$ or :

$$\text{nombre de molécules de } N_2 = \frac{\text{masse}(N_2) \times N_A}{M(N_2)} \text{ avec}$$

$$\text{masse}(N_2) = \text{volume(salle)} \times \text{masse volumique(air)} \times \text{pourcentage d'azote}$$

Donc l'ordre de grandeur du nombre de molécules de diazote vaut :

$$\frac{10^2 \times 10^0 \times 10^0 \times 10^{24}}{10^1} = 10^{25}.$$

### 4 Que d'eau, que d'eau !

1,5 L d'eau pèse 1,5 kg soit $10^0$ kg, l'ordre de grandeur de la masse molaire de l'eau est $10^1$ g.mol$^{-1}$ et l'ordre de grandeur de la constante d'Avogadro est $10^{24}$ mol$^{-1}$.

Or, le nombre de molécules d'eau dans une bouteille d'eau est $\frac{m(H_2O) \times N_A}{M(H_2O)}$ ce qui donne en ordre de grandeur : $\frac{10^0 \times 10^{24}}{10^1} = 10^{23}$.

### 5 Modes de transferts

**a.** Vrai, même si la convection prédomine largement dans les liquides donc qu'un élève réponde faux n'est pas absurde surtout au regard de la définition de la conduction (pas de transport de matière).

**b.** Vrai par définition.

**c.** Vrai : ce fluide peut être un gaz ou un liquide.

### 6 À la casserole

Il y a transfert thermique par conduction entre la main et la queue de la casserole, par conduction aussi entre la plaque de chauffage et la casserole, par convection dans l'eau en mouvement contenue dans la casserole et par rayonnement entre la plaque de chauffage et la casserole.

### 7 Vrai ou faux ?

**a.** Faux : tout objet émet un rayonnement thermique.

**b.** Faux : la bougie transmet de l'énergie par rayonnement mais pas par conduction (sauf si on touche la flamme…).

**c.** Faux : ses modes principaux de transfert sont la convection (par l'air) et le rayonnement. Les cheminées sont construites normalement pour qu'il n'y ait pas transfert par conduction en disposant entre le foyer (l'insert) et les murs des isolants.

### 8 Chauffage central

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 630.*

### 9 Conduction, convection ou rayonnement ?

**a.** Convection et rayonnement.

**b.** Conduction et rayonnement.

**c.** Conduction et rayonnement.

**d.** Conduction et rayonnement.

**e.** Convection (et parfois rayonnement pour certains radiateurs).

### 10 Variation d'énergie interne

On note $\Delta U$ la variation d'énergie interne du système étudié et $m$ la masse du système.

**a.** $\Delta U = mc_{eau}\Delta T = 1\,50 \times 4\,180 \times (60 - 15)$
$= 2{,}8.10^7$ J

**b.** $\Delta U = mc_{fonte}\Delta T = 10 \times 4{,}70.10^2 \times (20 - 130)$
$= -5{,}2.10^5$ J

### 11 Variation de température

On note $\Delta U$ la variation d'énergie interne du système étudié et $m$ la masse du système.

**a.** $\Delta T = \frac{\Delta U}{mc_{eau}} = \frac{8{,}360.10^6}{200 \times 4180} = 10{,}0$ °C (ou K)

**b.**
$\Delta T = \frac{\Delta U}{mc_{éthanol}} = \frac{64.10^3}{10 \times 0{,}79 \times 2461} = 3{,}3$ °C (ou K)

**c.** $\Delta T = \frac{\Delta U}{mc_{fer}} = \frac{88{,}8.10^3}{1 \times 444} = 200$ °C (ou K)

### 12 Chauffages

On note $\Delta U$ la variation d'énergie interne du système étudié.

Une masse d'eau $m$ dont la température augmente de $\Delta T$ a une énergie interne qui varie de $\Delta U = mc\Delta T$.

Une masse d'eau $2m$ dont la température augmente de $2\Delta T$ a une énergie interne qui varie de :
$\Delta U' = 2m \times c \times \Delta T = 4mc\Delta T$ donc $\Delta U' = 4\Delta U$

### 13 Du fer dans l'eau bouillante

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 630.*

### 14 Analyse qualitative d'échanges thermiques

**a.** La température de l'eau du biberon augmente et celle de l'eau du chauffe-biberon reste globalement stable si le chauffe-biberon est resté branché ou diminue s'il a été arrêté.

**b.** Il y a contact entre l'eau chaude du chauffe-biberon et le biberon.
Donc l'eau chaude transfère de l'énergie par conduction aux parois du biberon qui transfère cette énergie au lait contenu dans le biberon.

**c.** Il y a aussi échanges énergétiques entre l'eau du chauffe-biberon et les parois du chauffe-biberon ainsi qu'entre l'eau du chauffe-biberon et l'air (contact très faible dans le cas du chauffe-biberon de la photo).

### 15 Un bon bain…

**a.** Le transfert a lieu par convection, il y a mouvement de matière.

**b.** Si les pertes sont négligeables, les seuls échanges ont lieu entre l'eau chaude et l'eau froide. La variation d'énergie interne du système {eau chaude + eau froide} est donc nulle.

On note :

- $m_{chaud}$ la masse d'eau chaude,
- $m_{froid}$ la masse d'eau froide,
- $T_f$ la température finale de l'ensemble,
- $T_{chaud}$ la température initiale de l'eau chaude,
- $T_{froid}$ la température initiale de l'eau froide.

$m_{chaud}c_{eau}(T_f - T_{chaud}) + m_{froid}c_{eau}(T_f - T_{froid}) = 0$

donc

$$m_{froid} = \frac{-\ m_{chaud}c_{eau}(T_f - T_{chaud})}{c_{eau}(T_f - T_{froid})}$$

$$= \frac{100 \times 4\ 180 \times (65 - 35)}{4\ 180 \times (35 - 20)} = 200 \text{ kg}$$

soit 200 L.

**c.** Il ne faut pas négliger les échanges énergétiques avec la baignoire elle-même et avec l'air : ils refroidissent l'eau chaude donc le volume d'eau froide à ajouter est plus faible que celui calculé.

### 16 Une brique comme chauffe-eau

On suppose que toute l'énergie perdue par la brique est reçue par l'eau :

$m_{brique}c_{brique}(T_3 - T_1) + m_{eau}c_{eau}(T_3 - T_2) = 0$

d'où

$$T_3 = \frac{m_{brique}c_{brique}T_1 + m_{eau}c_{eau}T_2}{m_{brique}c_{brique} + m_{eau}c_{eau}}$$

$$= \frac{1{,}0 \times 840 \times 90 + 5{,}0 \times 4\ 180 \times 20}{1{,}0 \times 840 + 5{,}0 \times 4\ 180} = 23\ °C.$$

### 17 Pertes par une paroi

**a.** On note $\Phi$ le flux thermique, $Q$ la perte d'énergie et $\tau$ la durée du transfert d'énergie.

$$\Phi = \frac{Q}{\tau} = \frac{2{,}5.10^2}{30 \times 60} = 0{,}14 \text{ W}.$$

**b.** Le mode de transfert est la conduction.

**c.** On note $\Phi$ le flux thermique, $R_{th}$ la résistance thermique, $T_1$ la température interne et $T_2$ la température externe.

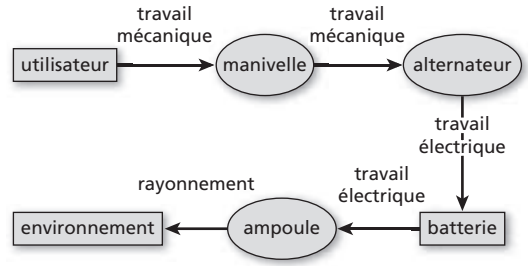
$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} = \frac{20 - 10}{0{,}14} = 71 \text{ K.W}^{-1}.$$

### 18 Flux et résistance

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 630.*

### 19 Chaîne énergétique

**a.**




**b.** le rond désigne un convertisseur d'énergie et le rectangle un réservoir d'énergie (qui est souvent aussi un convertisseur).

## Entraînement

### 20 Cumulus

**a.** Supposer les pertes énergétiques négligeables, signifie que les échanges n'ont lieu qu'entre l'eau chaude (énergie cédée notée $Q_{eau\ chaude}$) et l'eau froide (énergie reçue notée $Q_{eau\ froide}$) donc :

- $Q_{eau\ froide} + Q_{eau\ chaude} = 0$. On note :
- $m_{eau\ chaude}$ la masse d'eau chaude,
- $m_{eau\ froide}$ la masse d'eau froide,
- $T_f$ la température finale de l'ensemble,
- $T_{eau\ chaude}$ la température initiale de l'eau chaude,
- $T_{eau\ froide}$ la température initiale de l'eau froide.

$Q_{eau\ chaude} = m_{eau\ chaude}c_{eau}(T_f - T_{eau\ chaude})$
et $Q_{eau\ froide} = m_{eau\ froide}c_{eau}(T_f - T_{eau\ froide})$

d'où :

$$T_3 = \frac{m_{eau\ froide}c_{eau}T_{eau\ froide} + m_{eau\ chaude}c_{eau}T_{eau\ chaude}}{m_{eau\ froide}c_{eau} + m_{eau\ chaude}c_{eau}}$$

$$= \frac{100 \times 60 + 50 \times 15}{100 + 50} = 45\ °C.$$

**b.** On note $\Delta U$ l'énergie à fournir à l'eau pour que sa température augmente de $\Delta T$ :

$\Delta U = mc_{eau}\Delta T = 100 \times 4\ 180 \times (60 - 15) = 1{,}9.10^7$ J

$\Delta U$ est l'énergie à fournir à cette eau avec une puissance $P$ de 3 000 W et donc une durée $\Delta t$ nécessaire de :

$$\Delta t = \frac{\Delta U}{P} = \frac{1{,}9.10^7}{3000} = 6{,}3.10^3 \text{ s}$$

soit environ 1 h 45 min.

**c.** Au bout de $\Delta t$ = 30 min, l'eau a reçu une énergie $\Delta U' = P\Delta t = 3\ 000 \times 30 \times 60 = 5{,}4.10^6$ J.

Donc la variation de température $\Delta T$ des 100 L (de masse $m$ = 100 kg) d'eau vaut :

$$\Delta T = \frac{\Delta U'}{mc_{eau}} = \frac{5{,}4.10^6}{100 \times 4\ 180} = 13\ °C \text{ (ou K)}$$

Il y a donc dans le ballon 100 L à 60 °C mélangés à 100 L à 13 °C donc une température moyenne de :

$$\frac{13 + 60}{2} = 37\ °C.$$

Donc Alexandre ne pourra pas prendre un bain à la même température qu'Antoine, son bain sera même plutôt frais, la température étant seulement celle du corps.

### 21 Ballon électrique d'eau chaude

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 630.*

### 22 Rendement d'un moteur électrique

**1.a.** $P_1 = U_1 I_1 = 24 \times 2{,}0 = 48$ W.

**b.** Le moteur reçoit cette énergie par travail électrique.

**c.** L'énergie $E_1$ consommée par le moteur au bout d'une durée $\Delta t$ = 15 min vaut :

$E_1 = P_1 \Delta t = 48 \times 15 \times 60 = 4{,}3.10^4$ J

**2.a.** Le transfert se fait par travail mécanique.

**b.** $$\eta = \frac{\text{énergie transférée}}{\text{énergie consommée}} = \frac{36.10^3}{43.10^3} = 0{,}84$$

### 23 Détermination d'un matériau

**a.** Le transfert se fait par conduction.

**b.** On note $\Phi$ le flux thermique, $R_{th}$ la résistance thermique, $T_1$ la température intérieure et $T_2$ la température extérieure.

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\Phi} = \frac{22 - 8}{3{,}0.10^3} = 4{,}7.10^{-3}\ \text{K.W}^{-1}.$$

**c.** La valeur la plus proche est celle du béton plein.

**d.** Le plus le plus isolant est le matériau ayant la plus grande résistance thermique, donc le parpaing.

### 24 Un mur au soleil

**a.** Le transfert thermique se fait principalement par rayonnement et un peu par conduction (contact entre l'air chaud et le mur).

**b.** On note $\Delta U$ la variation d'énergie interne du mur et $\Delta T$ la variation de température du mur :

$\Delta U = mc\Delta T = 5{,}0.10^3 \times 840 \times (35 - 14) = 8{,}8.10^7$ J.

**c.** On note $\Delta U'$ la variation d'énergie interne du mur et $\Delta T'$ la variation de température du mur :

$\Delta U' = mc\Delta T' = 5{,}0.10^3 \times 840 \times (16 - 35)$

$= -\ 8{,}0.10^7$ J.

L'énergie est transférée par conduction entre le mur et l'air et par rayonnement (IR en particulier).

### 25 Mesure de la capacité thermique d'une bouteille thermos

**a.** L'équilibre thermique étant atteint avant l'ajout d'eau chaude, la bouteille thermos a la même température que l'eau qu'elle contient, soit 15,0 °C.

**b.** $Q_1 = m_1 c_{eau}(T_3 - T_1)$.

**c.** $Q_2 = m_2 c_{eau}(T_3 - T_2)$.

**d.** $Q_1 = 0{,}150 \times 4\ 180 \times (27{,}0 - 15{,}0) = 7{,}52.10^3$ J

$Q_2 = 0{,}200 \times 4\ 180 \times (27{,}0 - 40{,}0) = -\ 10{,}9.10^3$ J

**e.** Il n'y a pas égalité entre $Q_1$ et $Q_2$ car l'échange énergétique se fait aussi avec le thermos.

**f.** Il faut donc aussi évaluer l'énergie reçue par le calorimètre $Q_{cal} = C_{cal}(T_3 - T_1)$ avec :

$Q_1 + Q_2 + Q_{cal} = 0$ donc :

$C_{cal}(T_3 - T_1) = -\ Q_1 - Q_2$ soit :

$$C_{cal} = \frac{-\ 7{,}52 + 10{,}9}{27{,}0 - 15{,}0} = 0{,}282\ \text{J.K}^{-1}$$

### 26 Trois liquides

**a.** Les transferts d'énergie sont de deux ordres : rayonnement et, pour une part beaucoup plus faible, convection (l'air chauffée par la lampe conduit la chaleur vers le récipient).

**b.** On note $m$ = 330 g la masse de liquide et $\Delta T$ la variation de température du liquide. L'énergie reçue par l'eau est :

$\Delta U = mc_{eau}\Delta T = 0{,}330 \times 4\ 180 \times (24 - 20)$

$= 5{,}5.10^3$ J.

**c.** L'huile a reçu la même quantité d'énergie $\Delta U$ mais a subi une variation de température $\Delta T'$ différente donc : $\Delta U = mc_{huile}\Delta T' = 5{,}5.10^3$ J

Et donc : $$c_{huile} = \frac{5{,}5.10^3}{0{,}330 \times 0{,}92 \times (29 - 20)}$$

$$= 2{,}0.10^3\ \text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1},$$

La masse d'huile est obtenue par le produit volume et masse volumique.

De même pour l'éthanol :

$$c_{éthanol} = \frac{5{,}5.10^3}{0{,}330 \times 0{,}79 \times (29 - 20)}$$

$$= 2{,}3.10^3\ \text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}.$$

## Approfondissement

### 27 Murs et bois et en béton

**1.** $r_s = \dfrac{e}{\lambda}$ donc unité$(r_s) = \dfrac{\text{unité}(e)}{\text{unité}(\lambda)}$

$= \dfrac{\text{m}}{\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}} = \text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$

$R_{th}$ s'exprime en $\text{K.W}^{-1}$ et $S$ en $\text{m}^2$ donc le lien donné par les unités est $r_s = R_{th} \times S$

**2.** $R_{th} = \dfrac{r_s}{S} = \dfrac{e}{\lambda S}$

**3.** $r_s = \dfrac{e}{\lambda} = \dfrac{0{,}20}{1{,}7} = 0{,}12\ \text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$

**4.** $r_s = \dfrac{e}{\lambda} = \dfrac{0{,}20}{0{,}20} = 1{,}0\ \text{m}^2.\text{K.W}^{-1}$

**5.a.** Le transfert se fait du corps chaud vers le corps froid donc de l'intérieur de la maison vers l'extérieur.

**b.** On note $\Phi$ le flux thermique à travers une paroi, $T_1$ la température intérieure et $T_2$ la température extérieure.

$\Phi_{\text{béton}} = \dfrac{T_1 - T_2}{R_{th}} = \dfrac{S \times (T_1 - T_2)}{r_s} = \dfrac{10 \times (12 - 18)}{0{,}12}$

$= -\ 500\ \text{W}.$

$\Phi_{\text{bois}} = \dfrac{T_1 - T_2}{R_{th}} = \dfrac{S \times (T_1 - T_2)}{r_s} = \dfrac{10 \times (12 - 18)}{1{,}0}$

$= -\ 60\ \text{W}.$

La perte à travers le mur en bois est bien plus faible qu'à travers le mur en béton est peut-être compensée facilement par un petit chauffage intermittent.

### 28 Panneaux solaires

**1.** $1\ \text{kWh} = 3\ 600.10^3\ \text{J}$ donc

$1{,}41\ \text{kWh.m}^{-2} = 5{,}08.10^6\ \text{J.m}^{-2}$.

Et $5{,}38\ \text{kWh.m}^{-2} = 1{,}94.10^7\ \text{J.m}^{-2}$.

**2.a.** En janvier il faut faire passer la masse $m = 250$ kg (250 L) d'eau de $T_1 = 9$ °C à $T_2 = 55$ °C donc l'eau doit recevoir une énergie :

$\Delta U = mc_{\text{eau}}(T_2 - T_1) = 250 \times 4\ 180 \times (55 - 9)$

$= 4{,}8.10^7\ \text{J}.$

En juillet il faut faire passer la masse $m = 250$ kg (250 L) d'eau de $T_3 = 16$ °C à $T_2 = 55$ °C donc l'eau doit recevoir une énergie :

$\Delta U' = mc_{\text{eau}}(T_2 - T_3) = 250 \times 4\ 180 \times (55 - 16)$

$= 4{,}1.10^7\ \text{J}.$

**b.** L'énergie moyenne reçue est le produit de la surface par l'énergie surfacique moyenne. Un panneau a une surface de $2{,}15\ \text{m}^2$ donc

• en janvier l'énergie reçue par un panneau est :

$E_{\text{janv}} = 5{,}08.10^6 \times 2{,}15 = 1{,}09.10^7$ J et

• en juillet l'énergie reçue par un panneau est :

$E_{\text{juil}} = 1{,}94.10^7 \times 2{,}15 = 4{,}17.10^7$ J.

**3.a.** Le rendement est :

$\eta = \dfrac{\text{énergie transmise à l'eau}}{\text{énergie reçue par le panneau}}$

**b.** En janvier, un panneau transfère une énergie $E_1 = \eta E_{\text{janv}} = 0{,}75 \times 1{,}09.10^7 = 8{,}2.10^6$ J à l'eau.

Or il faut au total sur une journée $\Delta U = 4{,}8.10^7$ J donc le nombre de panneaux vaut :

$\dfrac{\Delta U}{E_1} = \dfrac{4{,}8.10^7}{8{,}2.10^6} = 5{,}9$ soit 6 panneaux solaires.

En juillet, un panneau transfère une énergie :

$E_2 = \eta E_{\text{juil}} = 0{,}75 \times 4{,}17.10^7 = 3{,}1.10^7$ J à l'eau.

Or, il faut au total sur une journée $\Delta U' = 4{,}8.10^7$ J donc le nombre de panneaux vaut :

$\dfrac{\Delta U'}{E_2} = \dfrac{4{,}1.10^7}{3{,}1.10^7} = 1{,}3$ soit 2 panneaux solaires.

**4.** Pour limiter le coût d'une installation dont la surface ne serait justifiée que quelques mois dans l'année, on se contente donc par exemple de deux panneaux solaires qui l'hiver sont complétés par un chauffage d'appoint.

### 29 Dans le congélateur

**1.** On note $\Delta U_1$ l'énergie cédée par la masse $m = 5{,}0$ kg d'aliments pour la baisse de température de $\Delta T_1 = -\ 23$ °C :

$\Delta U_1 = m_{\text{aliment}} c \Delta T_1 = 5{,}0 \times 3{,}4.10^3 \times (0 - 23)$

$= -\ 3{,}9.10^5\ \text{J}.$

**2.** L'énergie est reçue par le fluide qui circule dans le circuit de congélation du congélateur.

Cette énergie est transférée par conduction entre aliments et l'air, puis convection dans l'air du congélateur puis par conduction entre l'air du congélateur et le circuit de refroidissement.

**3.** L'énergie $\Delta U_2$ cédée par les aliments vaut :

$5{,}0 \times -\ 250 = -\ 1{,}3.10^6$ J (le signe $-$ indique que ce sont les aliments qui cèdent l'énergie).

**4.a.** Les aliments perdent de nouveau de l'énergie donc la variation d'énergie des 5,0 kg d'aliments vaut $-\ 1{,}8.10^3$ kJ. L'échange a lieu des aliments vers le fluide du congélateur.

**b.** Soit $c'$ la capacité thermique massique des aliments congelés, $\Delta U_3$ l'énergie cédée par les aliments dont la température varie de $\Delta T_3 = -\ 18$ °C.

On a :

$\Delta U_3 = -\ 1{,}8.10^3$ J $= mc'\Delta T_3$

soit $c' = \dfrac{-\ 1{,}8.10^6}{5{,}0 \times (-\ 18)} = 2{,}0.10^4$ J.kg$^{-1}$.K$^{-1}$

**c.** Au total les aliments subissent une variation d'énergie valant :

$\Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3 = -\ 3{,}9.10^5 - 1{,}3.10^6 - 1{,}8.10^6$

$= -\ 3{,}5.10^6$ J

Le congélateur reçoit donc $E_{reçu} = 3{,}5.10^6$ J.

La puissance du congélateur est $P = 500$ W, la durée $\Delta t$ nécessaire pour ce transfert d'énergie est donc :

$\Delta t = \dfrac{E_{reçu}}{P} = \dfrac{3{,}5.10^6}{500} = 7{,}0.10^3$ s

soit environ 1 h 56 min.

Cette durée concerne 5,0 kg d'aliments.

En 24 h soit une durée environ 12 fois plus importante on peut congeler $5{,}0 \times 12 = 60$ kg d'aliments.

## Exercices de BAC

### 30 Plaquettes de freins de VTT

**I.1.** Il y a transfert d'énergie par conduction.

**2.** Il y a une élévation de température, aussi bien sur la partie carbone de la plaquette que sur la partie acier du disque, ce qui, microscopiquement, correspond à une plus grande agitation des atomes constituant la plaquette et le disque.

**3.** Le transfert d'énergie a lieu par conduction entre la partie carbone et la partie acier de la plaquette, en effet il n'y a pas transfert de matière (donc pas de convection) et le transfert par rayonnement est négligeable par rapport au transfert par conduction.

**II.1.a.** Le transfert d'énergie se fait du corps le plus chaud vers le corps le plus froid donc ici du carbone vers l'acier (**fig. 2** du manuel de l'élève).

**b.** La température finale serait la moyenne des températures initiales s'il s'agissait du même matériau et si les masses des deux étaient égales.

**2.a.** Si on suppose que seuls ces deux matériaux n'échangent de l'énergie qu'entre eux, en notant $\Delta U_{acier}$ la variation d'énergie interne de l'acier et $\Delta U_{carbone}$ la variation d'énergie interne du carbone, on peut écrire que $\Delta U_{acier} + \Delta U_{carbone} = 0$.

On note $T_{i,acier}$ la température initiale de l'acier et $T_{i,carbone}$ la température initiale du carbone et $T_f$ la température finale de l'ensemble, donc :

$\Delta U_{acier} = m_{acier}c_{acier}(T_f - T_{i,acier})$ et

$\Delta U_{carbone} = m_{carbone}c_{carbone}(T_f - T_{i,carbone})$ d'où

$$T_f = \frac{m_{acier}c_{acier}T_{i,acier} + m_{carbone}c_{carbone}T_{i,carbone}}{m_{acier}c_{acier} + m_{carbone}c_{carbone}}$$

$$= \frac{0{,}150 \times 446 \times 30 + 0{,}050 \times 710 \times 70}{0{,}150 \times 446 + 0{,}050 \times 710} = 44\ °C.$$

**b.** Sur le graphe, la valeur lue est de 40 °C donc plus faible que celle calculée, cela s'explique par l'existence d'échanges d'énergie avec d'autres systèmes (l'enceinte elle-même par exemple).

**III.1.a.** L'enceinte étant calorifugée, les trois éléments présents vont tendre vers une température commune par un échange énergétique entre eux.

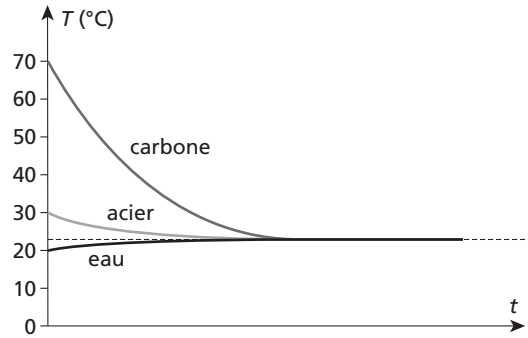
**b.** L'eau, l'acier et le carbone auront la même température finale.

**2.** La variation d'énergie interne de la masse $m = 200$ g d'eau (200 mL) subissant une variation de température $\Delta T$ est :

$\Delta U_{eau} = m_{eau}c_{eau}\Delta T = 0{,}200 \times 4{,}18.10^3 \times (22{,}6 - 20)$

$= 2{,}2.10^3$ J

**3.** On obtient la représentation graphique suivante :




### 31 Bouilloire et thermoplongeur

**I.1.** Pour une masse d'eau $m_{eau} = 1{,}0$ kg (correspondant à un volume de 1,0 L) subissant une variation de température $\Delta T = 50$ °C on a :

$Q_1 = m_{eau}c_{eau}\Delta T = 1{,}0 \times 4{,}18.10^3 \times 50 = 2{,}1.10^5$ J.

**2.a.** La bouilloire reçoit l'énergie par travail électrique.

**b.** L'énergie est transférée à l'eau par conduction entre la résistance de la bouilloire et l'eau.

**c.** Il y a augmentation de l'agitation microscopique des molécules d'eau entraînant en particulier le phénomène de convection permettant au transfert de chaleur de se faire dans toute l'eau de la bouilloire.

**d.** $r = \dfrac{\text{énergie transférée à l'eau}}{\text{énergie consommée par la bouilloire}}$

**e.** Ce rendement vaut 1 car on suppose que toute l'énergie reçue est transférée à l'eau. Cette valeur est bien sûr fausse car une partie de l'énergie est transférée à la bouilloire et à l'environnement.

**f.** En utilisant les réponses des questions **1.**, **2.d** et **2.e**. on a : énergie consommée par la bouilloire $= W_e$

$= \dfrac{Q_1}{1} = 2{,}1.10^5$ J $= 2{,}1.10^2$ kJ.

**g.** La puissance de la bouilloire est $P_1 = 2\,200$ W donc la durée $\Delta t$ de fonctionnement de la bouilloire est :

$$\Delta t = \frac{\text{énergie consommée par bouilloire}}{\text{puissance}} = \frac{W_e}{P_1}$$

$$= \frac{2{,}1.10^5}{2\,200} = 95 \text{ s} \quad \text{soit 1 min 35.}$$

**3.** Pour le thermoplongeur de puissance $P_2 = 750$ W :

$$\Delta t = \frac{W_e}{P_2} = \frac{2{,}1.10^5}{750}$$

$= 2{,}8.10^2$ s soit 4 min 40 environ.

**II.1.** Les durées de chauffe sont plus grandes car les rendements ne sont pas de 1, une partie de l'énergie fournie par les systèmes de chauffe n'est pas transférée à l'eau mais à l'environnement (récipient, air…).

**2.a.** Pendant $\Delta t = 1$ min 55 s la bouilloire reçoit une énergie : $W_e' = P_1 \Delta t = 2\,200 \times 115 = 2{,}53.10^5$ J.

**b.** Le rendement de la bouilloire vaut :

$$\frac{\text{énergie transférée à l'eau}}{\text{énergie reçue par la bouilloire}} = \frac{Q_1}{W_e'}$$

$$= \frac{2{,}1.10^5}{2{,}53.10^5} = 0{,}83.$$

**c.** La bouilloire isole bien de l'extérieur, ce qui ne veut pas dire qu'elle ne reçoit pas elle-même une partie de l'énergie.

**3.a.**

$$r = 0{,}60 = \frac{\text{énergie transférée à l'eau}}{\text{énergie reçue par le thermoplongeur}}$$

$$= \frac{Q_1}{W_e''} \text{ donc } W_e'' = \frac{Q_1}{r} = \frac{2{,}1.10^5}{0{,}60} = 3{,}5.10^5 \text{ J.}$$

Donc la durée de fonctionnement $\Delta t$ vaut :

$$\Delta t = \frac{W_e''}{P_2} = \frac{3{,}5.10^5}{750} = 4{,}7.10^2 \text{ s soit près de 8 min.}$$

Le rendement est faible car le thermoplongeur n'est pas associé à un système isolant comme la bouilloire. L'échange énergétique entre l'eau chauffée, le thermoplongeur et l'extérieur est important donc les pertes énergétiques sont nombreuses.

## 32 Bonne ou mauvaise isolation ?

**I.1.** Soit $\Delta t$ la durée de fonctionnement : l'énergie $E$ fournie à la pièce pendant cette durée par les radiateurs de puissance $P = 1\,000$ W est :

$E = P\Delta t = 1\,000 \times 2{,}5 = 2{,}5$ kWh.

**2.** L'énergie est reçue par les radiateurs par conduction, l'eau étant en contact avec la partie métallique des radiateurs.

**3.** L'énergie est transférée en premier temps par conduction (contact entre métal du radiateur et l'air) puis se propage dans l'air de la pièce par convection.

Le transfert par rayonnement peut aussi être évoqué ; il dépend en particulier du type de radiateur électrique utilisé.

**4.a.** Toute l'énergie transférée des radiateurs à l'air de la pièce a été perdue (fenêtres, portes, murs…)

**b.** La consommation d'énergie pour cette pièce est donc de 2,5 kWh pour 5 heures.

**c.** La réglementation donne la consommation maximale par an et par m$^2$ soit 50 kWh.an$^{-1}$ par m$^2$.

Donc $\dfrac{50.10^3 \times 5}{365 \times 24} = 29$ Wh pour 5 h pour 1 m$^2$

Donc $29 \times 27 = 0{,}78$ kWh pour cette pièce en 5 h ce qui est inférieur à la consommation calculée à la question **1.**

**d.** En basant le raisonnement sur cette seule pièce pour cette durée de 5 h, la maison ne respecte pas la réglementation.

**e.** Ce raisonnement est, bien sûr, incorrect car d'autres pièces consomment peut-être moins : il faut effectuer le bilan sur la maison en entier et certaines périodes de l'année (l'été par exemple), il n'y a pas de consommation électrique pour le chauffage.

Il faut donc étudier la consommation aussi sur une année entière.

**II.1.a.** Soit $E_P$ l'énergie perdue pendant la durée $\Delta t = 1$ h :

$E_P = \Phi_{ext} \times \Delta t = 100 \times 3\,600 = 3{,}6.10^5$ J ou 100 Wh.

**b.** $R_{th} = \dfrac{T_{int} - T_{ext}}{\Phi_{ext}} = \dfrac{20 - 8}{100} = 0{,}12$ K.W$^{-1}$.

**c.** La surface du mur donnant sur l'extérieur est de 25 m$^2$ donc la résistance thermique surfacique vaut :

$$SR_{th} = 25 \times 0{,}12 = 3{,}0 \text{ m}^2\text{.K.W}^{-1}$$

Cette valeur est supérieure à la valeur minium de 2,3 m$^2$.K.W$^{-1}$ .

**2.a.** La valeur minimale de la résistance thermique surfacique est 2,5 $m^2.K.W^{-1}$ ce qui donne pour la résistance thermique, sachant que la surface du plafond est 27 $m^2$ :

$$R_{th} = \frac{2,5}{27} = 9,3.10^{-2}\ K.W^{-1}.$$

**b.** Le flux maximal $\Phi_{ext}$ perdu est donc :

$$\Phi_{ext} = \frac{T_{int} - T_{combles}}{R_{th}} = \frac{20 - 10}{9,3.10^{-2}} = 1,1.10^{2}\ W$$

**3.** En ajoutant de la laine de verre, le flux thermique diminue (moins de pertes) donc la résistance thermique augmente.

**III.** *Analyse de la question*

Faire un lien entre les caractéristiques des matériaux et la nécessité de limiter les pertes d'énergie.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** La réglementation a pour but d'inciter à **limiter** les **pertes énergétiques** donc à limiter le **flux thermique transféré** de l'intérieur vers l'extérieur de l'habitation.

**2.** Limiter les pertes impose d'utiliser des matériaux de **grande résistance thermique** ou d'**associer des matériaux** pour obtenir une meilleure résistance thermique (laine de verre ajoutée par exemple).

**3.** Le choix des matériaux **dépend des murs**, un mur donnant sur une autre pièce n'ayant pas besoin d'un matériau aussi performant d'un mur donnant sur l'extérieur.

**4.** En cas de besoin, avoir recours à un spécialiste des flux.

## Rédiger une synthèse de documents

### 33 La pompe à chaleur

*Analyse de la question*

Explication du fonctionnement d'une pompe à chaleur avec chaîne énergétique en appui et exploitation des valeurs données.

*Pistes de réponses et mots-clés*

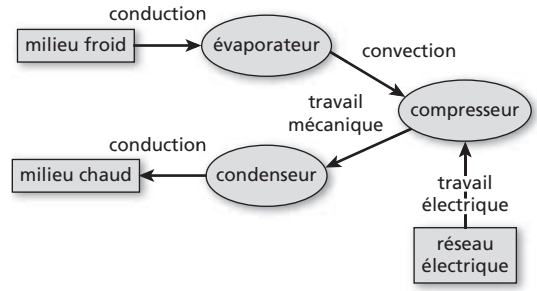
**1.** Le principe d'une **pompe à chaleur** est de **prélever dans un milieu « froid » de l'énergie pour le transférer vers un milieu chaud**. Ce sens de transfert opposé au sens naturel nécessite un **apport d'énergie**.

**2.** La **puissance absorbée** est la puissance que consomme la pompe à chaleur pour son fonctionnement, consommation qui augmente d'autant plus que la température du milieu froid est faible.

**3.** La **puissance calorifique** est la puissance fournie par la pompe au milieu chaud, puissance d'autant plus élevée que la température du milieu froid est élevée.

**4.** L'**évaporateur** est le lieu de l'absorption de l'énergie du milieu froid, cette énergie est captée par un **fluide**. Ce fluide est compressé dans le compresseur (il y a consommation d'énergie reçue par travail électrique pour le fonctionnement du compresseur), le fluide passe alors dans le condenseur, lieu de transfert de l'énergie vers le milieu froid.

On obtient la chaîne énergétique suivante :



Chapitre 16

# Introduction à la physique quantique

## Introduction au chapitre (p. 405)

Ce chapitre propose une introduction à la mécanique quantique, en particulier en montrant le rapport entre matière et énergie.

Il se place dans la continuité des notions de niveaux d'énergie et de transferts quantiques abordés en classe de Première S. Comme le précise le programme officiel, l'étude de la lumière laser est une entrée accessible et privilégiée : « *au niveau quantique, le laser s'avère être un objet et un outil d'étude privilégié des transferts d'énergie […] ; sa présentation doit avoir comme seule fin de comprendre le principe du pompage optique et de l'amplification cohérente et directive d'un rayonnement monochromatique incident, dans l'enceinte d'un oscillateur optique* ».

L'étude des transferts énergétiques et de l'exemple du laser permet, en outre, une entrée sur la dualité onde-corpuscule pour le photon et pour des particules telles que les électrons, les neutrons ou même certaines molécules.

Cette étude permet de réinvestir les notions d'interférences et de diffraction abordées en début d'année scolaire lors de l'étude des propriétés des ondes mécaniques et lumineuses et de mettre en évidence de façon expérimentale le caractère ondulatoire de la matière. Comme le précise le programme, « l'observation (vidéo) de la réalisation progressive de la figure d'interférences obtenue en émettant le rayonnement photon par photon, ou la matière particule par particule, souligne l'étrangeté éventuelle des phénomènes quantiques pour le sens commun. Elle est une illustration parmi d'autres de l'aspect probabiliste de la réalité quantique » ; cette observation vidéo complète de façon pertinente l'activité 2 p. 407 du manuel de l'élève.

### LIENS UTILES

**1.** http://www.universcience.fr/fr/bibliotheque-bsi/contenu/c/1239022337751/les-applications-de-la-physique-quantique/

**2.** http://elementaire.web.lal.in2p3.fr/.

## Activités

Trois activités sont proposées dans ce chapitre :

- L'activité 1 propose une entrée historique sur la notion d'ondes de matières grâce à l'étude d'extraits de la thèse de de Broglie.
- L'activité 2 propose une exploitation quantitative d'une expérience d'interférences d'atomes de néon datant de 1992. Elle permet de réinvestir des notions de mécanique classique abordées précédemment dans l'année ainsi que celles sur les interférences.
- L'activité 3 propose une approche expérimentale de la mesure de distance à l'aide d'un laser selon deux techniques utilisées sur les chantiers de travaux publics. C'est également l'occasion de mettre en œuvre la notion d'incertitudes de la mesure.

### 1 Découverte des ondes de matière (p. 406)

Histoire des Sciences

#### *Objectif*

Cette activité, à caractère historique, est une entrée possible dans le chapitre 16 qui se place de façon pertinence en relation avec la partie 3 du cours intitulée « Dualité onde-corpuscule » p. 412 du manuel de l'élève.

Elle permet d'insister sur le caractère récent des travaux liés à la mécanique quantique, de montrer le génie et l'humilité d'un scientifique face à une théorie proposée.

### *Correspondance avec le programme*

• Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et la dualité onde-particule.

• Utiliser la relation de de Broglie : $p = \frac{h}{\lambda}$.

• Identifier des situations concrètes où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.

### *Corrigé*

**a.** Le terme $h\nu_0$ est en joule car $h$ est en J.s. Le terme $m_0c^2$ est le produit d'une masse par une vitesse au carré, comme dans l'expression de l'énergie cinétique, donc il est également homogène à une énergie. Chacun des deux termes de cette égalité a la dimension d'une énergie.

**b.** Ici, Louis de Broglie explique que cette hypothèse, base de la physique quantique, pourra présenter un intérêt si les conséquences que l'on en tire sont en accord avec les expériences. Ce sera le cas puisque, quelques années plus tard, l'expérience de la diffraction des électrons réalisée par Davisson et Germer étayera l'hypothèse de Louis de Broglie.

**c.** Louis de Broglie aurait pu tirer de cette hypothèse l'existence de la masse du photon, puisqu'il est associé à une fréquence.

**d.** Avec $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ et $p = \frac{E}{c}$ on a bien $p = \frac{h}{\lambda}$. La relation de Louis de Broglie ainsi écrite, permet d'attribuer à un photon dont la masse est nulle une quantité de mouvement $p = \frac{E}{c}$ alors que l'expression classique de la quantité de mouvement $p = mv$ ne permet pas l'existence d'une quantité de mouvement différente de 0 pour un photon de masse nulle.

Le caractère ondulatoire de la matière est observable pour les objets microscopiques mais pas pour les objets macroscopiques. Pour s'en convaincre, on peut réaliser un calcul de longueur d'onde de de Broglie avec un homme de masse $m = 80$ kg, de vitesse $v = 12$ km.h$^{-1}$, soit $p = mv = 2{,}7.10^2$ kg.m.s$^{-1}$. En appliquant la relation de de Broglie, on trouve une longueur d'onde $\lambda = 2{,}5.10^{-36}$ m.

Le caractère ondulatoire n'est, ici, pas observable au vu de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde.

**e.** Louis de Broglie a émis l'hypothèse d'une relation entre la quantité de mouvement d'une particule matérielle et une longueur d'onde, ouvrant ainsi la possibilité d'une dualité onde-particule pour la matière. Cela traduit la possibilité d'une onde de matière associée à une particule matérielle. Louis de Broglie peut être considéré comme l'un des découvreurs des ondes de matière ou, tout du moins, l'un des initiateurs de cette découverte, étayée ensuite par de nombreuses vérifications expérimentales puis par de nombreuses applications technologiques, dont le microscope électronique, par exemple.

### *Commentaires*

• Pour la question **b.** au-delà de l'aspect expérimental, il est intéressant de noter ici que c'est la fécondité d'une théorie qui peut la valider *a posteriori*.

• Pour la question **f.** l'hypothèse sera vérifiée trois ans plus tard par une première expérience de diffraction de particules matérielles, les électrons (puis par de nombreuses autres ensuite), et c'est ce qui valut à Louis de Broglie un prix Nobel en 1929.

## 2 Interférences atomiques (p. 407)

### *Objectif*

Cette activité, à caractère expérimental, est une entrée possible dans le chapitre 16 mais elle se place de façon pertinente en relation avec la partie 3 du cours intitulée « Dualité onde-corpuscule » p. 412 du manuel de l'élève. Elle permet d'insister sur le caractère récent des travaux liés à la mécanique quantique et de montrer des applications concrètes des ondes de matière comme celles citées dans le texte, à savoir : recherche d'eau, prospection minière ou pétrolière, étude des fonds marins.

### *Correspondance avec le programme*

• Extraire et exploiter des informations sur les ondes de matière et la dualité onde-particule.

• Extraire et exploiter des informations sur les phénomènes quantiques pour mettre en évidence leur aspect probabiliste.

• Identifier des situations concrètes où le caractère ondulatoire de la matière est significatif.

### *Corrigé*

**a.** D'après la **figure 2**, sur une longueur légèrement inférieure à 1 cm, on peut distinguer quatre franges donc $i$ a une valeur proche de 2 mm.

**b.** Le système étudié ici est le nuage d'atomes froids dans le référentiel, supposé galiléen, du laboratoire. La seule force extérieure appliquée au système est son poids $\vec{P}$.

Avec une étude énergétique, $v = \sqrt{2gh}$

avec $h = 0{,}035$ m et $g = 9{,}81.\text{m.s}^{-2}$, on a

$v = 0{,}83\ \text{m.s}^{-1}$.

**c.** La masse d'un atome de néon (Ne) est égale à : $m = 3{,}35.10^{-26}$ kg. Connaissant sa vitesse, on peut en déduire sa quantité de mouvement $p$ et donc sa longueur d'onde de de Broglie :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}63.10^{-34}}{3{,}35.10^{-26} \times 0{,}83} = 2{,}38.10^{-8}\ \text{m}.$$

**d.** L'expérience des fentes d'Young illustre l'aspect ondulatoire de la matière car elle permet de visualiser un phénomène propre aux ondes, les interférences. La **figure 2** montre également l'aspect corpusculaire grâce à la présence des impacts sur la plaque photographique.

**e.** La vitesse de l'ordre de 700 $\text{m.s}^{-1}$ est environ 1 000 fois plus grande que celle de l'expérience décrite ici, ainsi la longueur d'onde de de Broglie serait 1 000 fois plus petite (de l'ordre de $10^{-11}$ m) et l'interfrange serait également 1 000 fois plus petit (de l'ordre du micromètre) et donc invisible à l'œil nu.

**f.** D'après le travail réalisé aux questions précédentes, on a relié la vitesse $v$ des atomes de néon à l'interfrange d'une part et la valeur du champ de pesanteur d'autre part. Ainsi, la connaissance de la valeur de l'interfrange permet d'accéder à celle du champ de pesanteur.

**g.** Les paramètres entrant en jeu dans cette expérience sont :

• les différentes distances mises en jeu dans le dispositif, à savoir l'interfrange $i$, la hauteur $h$, l'écartement des fentes, la distance entre fentes et écran,

• la masse d'un atome.

La masse d'un atome est connue avec une grande précision. La précision sur $g$ est donc limitée en particulier par les connaissances des différentes distances, qu'il faut donc connaître avec d'autant plus de précision que l'on en souhaite sur $g$.

## 3 Mesurer une distance à l'aide d'un laser (p. 408)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale peut être proposée comme une contextualisation du laser comme outil d'investigation. Les notions abordées ne font pas appel au contenu spécifique du chapitre 16.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation.

### *Liste de matériel*

**Pour la première partie :**

• Un laser (ou diode laser).

• Un rapporteur en grand format imprimé sur une feuille de papier A4.

• Un mètre ruban.

• Une planche de carton avec des épingles.

**Pour la deuxième partie :**

• Un laser modulable en amplitude (à défaut, utiliser un déclenchement du système d'acquisition sur la fermeture d'un interrupteur commandant le laser).

• Un oscilloscope ou un système d'acquisition informatisé.

• Un miroir plan.

• Un photorécepteur (par exemple : phototransistor, photodiode, barrette de cellules photoélectriques, photorésistance) monté de manière à pouvoir visualiser le signal reçu.

### *Corrigé*

**a.** Connaissant AB, on mesure grâce à une visée les valeurs des angles B et C puis on utilise l'aide 1 pour calculer BC et AC.

Au cours des mesures, l'élève constate la grande difficulté de mesurer précisément un angle entre deux droites, surtout lorsque l'une des droites est matérialisée par un faisceau laser. Planter des épingles dans le carton pour ensuite tracer sur la feuille la droite correspondant au laser est une possibilité, mesurer directement l'angle sur un grand rapporteur en est une autre.

**b.** L'incertitude relative sur le résultat est la somme des incertitudes relatives sur les mesures de deux angles (incertitudes absolues au moins égales au degré, à évaluer en fonction du dispositif) et sur la mesure de la distance accessible. Les points faibles sont les mesures d'angles et de distances, bien sûr, mais l'élève doit se rendre compte que malgré le caractère apparemment approximatif de ces mesures, le résultat n'est pas mauvais (incertitude relative de l'ordre de 5 % sans trop d'efforts).

**c.** La distance disponible est $d = 3$ m environ, donc la durée de l'aller-retour est $\tau = \frac{2d}{c}$ et a pour ordre de grandeur $10^{-8}$ s.

**d.** La mesure avec un oscilloscope de lycée ou avec un système d'acquisition n'est pas possible car leur résolution est généralement insuffisante. Néanmoins, il faut inviter l'élève à sortir de cette frustration en tentant tout de même de valider la méthode, par exemple en lui proposant de faire la même mesure dans le couloir, avec une distance de l'ordre de grandeur de 30 m : alors, la mesure devient envisageable (mais elle est collective).

**e.** La mesure de $\tau$ étant, même lorsqu'elle est possible, très sujette à interprétation selon le photorécepteur employé, l'incertitude relative sur $d$ peut être assez grande (de l'ordre de 20 %). L'élève devra faire ici preuve d'esprit critique : la mesure par télémétrie est bien moins précise dans le cas rencontré que la mesure par visée.

# Exercices

## Applications

### 1 Analyse dimensionnelle

**a.** $E$ est en J et le produit $h\nu$ est en J.s.s$^{-1}$, donc en J : l'expression $E = h\nu$ est homogène.

**b.** $E$ est en J et le deuxième membre est en J.s.m.s$^{-1}$.m$^{-1}$ donc en J.

L'expression $E = \dfrac{hc}{\lambda}$ est homogène.

**c.** $h$ est en J.s, $\lambda$ en m et $p$ en kg.m.s$^{-1}$. Or l'unité joule correspond à kg.m$^2$.s$^{-2}$ (on le retrouve avec des expressions de l'énergie comme l'énergie de masse ou l'énergie cinétique) donc $h$ s'exprime en kg.m$^2$.s$^{-1}$, ce qui est bien équivalent à la dimension du produit $p\lambda$ en kg.m.s$^{-1}$.m.

**d.** On reprend le même raisonnement qu'à la question précédente :

$h$ en kg.m$^2$.s$^{-1}$, $\nu$ en s$^{-1}$, $c$ en m.s$^{-1}$

Donc le membre $\dfrac{h\nu}{c}$ s'exprime en kg.m.s$^{-1}$.

C'est aussi l'unité d'une quantité de mouvement qui est le produit d'une masse en kg par une vitesse en m.s$^{-1}$.

### 2 Photons de différents domaines

**a.** Onde radio : 1 500 m
donc $E = 1{,}33.10^{-28}$ J $= 8{,}29.10^{-10}$ eV.

**b.** Domaine du visible : 645 nm
donc $E = 3{,}08.10^{-19}$ J $= 1{,}93$ eV.

**c.** Rayons X : 0,55 nm
donc $E = 3{,}6.10^{-16}$ J $= 2{,}3.10^{3}$ eV.

**d.** Infrarouge : 8,0 µm
donc $E = 2{,}5.10^{-20}$ J $= 1{,}6.10^{-1}$ eV.

**e.** Ultraviolet : $260.10^{-9}$ m
donc $E = 7{,}65.10^{-19}$ J $= 4{,}78$ eV.

**f.** Rayonnement $\gamma$ : 18 pm
donc $E = 1{,}0.10^{-14}$ J $= 6{,}9.10^{4}$ eV.

### 3 Longueur d'onde et domaine

| $\lambda$ (m) | $f$ (Hz) | Domaine ou utilisation des ondes correspondantes |
|---|---|---|
| $6.10^{-7}$ | $5.10^{14}$ | visible |
| $1.10^{-14}$ | $3.10^{22}$ | radiothérapie par rayons gamma |
| $3.10^{-6}$ | $10^{14}$ | chauffage par infrarouges |
| $10^{-10}$ | $10^{2}$ | radioscopie par rayons X |

### 4 Absorption ou émission ou émission

**a.** L'énergie de l'état fondamental est nommée $E_0$. Les énergies des états excités sont nommées $E_1$, $E_2$ et $E_3$.

**b.** Flèches ① et ③ : émission.

Flèche ② : absorption.

Les fréquences correspondantes s'expriment littéralement :

$$\nu_1 = \frac{E_2 - E_0}{h} \qquad \nu_2 = \frac{E_3 - E_0}{h} \qquad \nu_3 = \frac{E_1 - E_0}{h}$$

**c.** Voir la **figure 4** p. 410 du manuel de l'élève.

### 5 Lumière et particules

**a.** $\lambda = \dfrac{c}{\nu} = 1{,}60.10^{-6}$m : c'est le domaine des infrarouges.

**b.** $E = h\nu = 1{,}25.10^{-19}$ J soit 0,779 eV.

**c.** La quantité de mouvement de l'électron s'écrit $p = \dfrac{h}{\lambda}$ d'une part et $p = m_e v_e$ d'autre part, donc $v_e = \dfrac{h}{\lambda m_e} = 455$ m.s$^{-1}$.

### 6 Un micromètre

Une onde a pour longueur d'onde $\lambda = 1{,}00$ µm.

**a.** $p = \dfrac{h}{\lambda} = 6{,}63.10^{-28}$ kg.m.s$^{-1}$

**b.** $E = 1{,}99.10^{-19}$ J

**c.** $v = \dfrac{p}{m_n} = 0{,}397$ m.s$^{-1}$

### 7 Longueur d'onde de de Broglie

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 639.*

### 8 Caractéristiques d'un laser

Les deux caractéristiques de la lumière laser illustrées par le schéma sont sa directivité et sa monochromaticité.

### 9 Laser…

**a.** Traduction en français de LASER : amplification de la lumière par émission stimulée de rayonnement.

**b.** Il s'agit donc de la production de lumière suite à une émission stimulée par un rayonnement incident. On parle d'amplification de lumière car, à chaque photon incident, un photon supplémentaire est issu de l'émission stimulée.

### 10 Émission stimulée

Voir la **figure 4** p. 410 du manuel de l'élève : le photon incident permet la transition de l'état excité vers un état d'énergie inférieure. Il n'y a donc pas d'absorption comme le laisse penser la première flèche ascendante.

### 11 Classe d'un laser

**a.** Un faisceau laser peut endommager irréversiblement l'œil humain.

**b.** Une mise en garde figure sur les pointeurs laser car la puissance des lasers de classe 2 est suffisamment élevée pour brûler les tissus du corps humain.

**c.** Un laser ultraviolet est plus dangereux qu'un laser visible car le rayon qui en est issu n'est pas visible à l'œil nu.

## Entraînement

### 12 Combinaison de relations

**a.** La vitesse d'une particule de masse $m$ est liée à sa quantité de mouvement par $p = mv$, elle-même liée à la longueur d'onde associée à la particule par $p = \frac{h}{\lambda}$. Cela donne $v = \frac{h}{m\lambda}$.

**b.** La fréquence $\nu$ vérifie $\nu = \frac{c}{\lambda}$, ce qui permet d'écrire, d'après la question précédente : $v = \frac{h\nu}{mc}$.

L'énergie cinétique correspondante est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{h^2\nu^2}{2mc^2}.$$

**c.** D'après $v = \frac{h}{m\lambda}$ et $\nu = \frac{c}{\lambda}$ il vient $\nu = \frac{cmv}{h}$.

### 13 Fréquence et énergie d'un photon laser

**a.** Le faisceau de ce laser n'est pas visible ; il est dans le domaine de l'infrarouge.

**b.** $\nu = \frac{c}{\lambda} = 3{,}1.10^{13}$ Hz.

**c.** $E = h\nu = 2{,}1.10^{-20}$ J = 0,13 eV.

### 14 Couleur de rayons laser

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève p. 639.*

### 15 Diffractométrie de neutrons

**a.** Les neutrons se comportent comme une onde, donc sont susceptibles de se diffracter.

**b.** Les neutrons sont électriquement neutres, donc n'interagissent pas avec la matière par interaction électrique.

**c.** Le cristal est composé de plusieurs atomes disposés à des distances variées les uns des autres. Ceci constitue de multiples ouvertures, dont chacune est susceptible de créer une diffraction des neutrons dans une direction donnée. La figure de diffraction présente donc différents pics, correspondant aux différentes diffractions possibles. Il est donc possible, en mesurant les angles de diffraction de ces pics, de connaître les tailles des structures diffractantes correspondantes.

### 16 Microscope à effet tunnel

**a.** Les particules qui subissent ici l'effet tunnel sont les électrons (du courant électrique).

**b.** La distance maintenue constante est celle séparant la pointe de l'échantillon.

**c.** L'échantillon n'est pas touché donc pas endommagé.

### 17 Énergie vibratoire

**a.** On a $E = 0{,}31$ eV soit $5{,}0.10^{-20}$ J.

On en déduit : $\lambda = h\frac{c}{E}$ soit $\lambda = 4{,}0.10^{-6}$ m.

**b.** Une solution aqueuse contenant cette molécule absorbe les radiations de cette longueur d'onde. En se désexcitant, les molécules réémettent la radiation, mais dans toutes les directions, ce qui crée tout de même un manque dans la direction de la lumière incidente : son spectre sera le spectre d'absorption de la molécule.

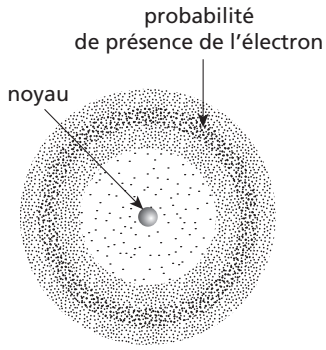
### 18 Probabilité de présence

**a.** Le rayon de Bohr de l'atome d'hydrogène est de 53 pm. D'après le graphique proposé, cette distance correspond au maximum de $P(r)$ pour la couche K, le rayon de Bohr peut donc être défini comme étant la distance au noyau pour laquelle la probabilité de présence de l'électron est maximale.

**b.** Cette définition est incompatible avec la représentation de l'atome sous la forme d'une sphère dure à l'intérieur de laquelle se trouvent l'électron et le noyau car la probabilité de présence de l'électron $P(r)$ est non nulle pour des valeurs de $r$ supérieur à 0 et allant jusqu'à 250 pm. Ainsi l'électron a une probabilité non nulle de se retrouver dans cet intervalle de distances ]0 pm ; 250 pm[.

**c.** D'après le graphique, la taille de l'atome dépend de son caractère excité puisque $P(r)$ est différent pour la couche L (en pointillés) et qu'alors la probabilité de présence de l'électron est maximale pour une valeur de $r$ égale à environ 275 pm.

**d.** Le modèle proposé d'une orbite fixe pour un électron propose une distance $r$ de l'électron fixe ce qui est en contradiction avec le modèle de Born. Un modèle plus adapté serait le suivant.
Il s'agit en fait du modèle de Schrödinger.




## Approfondissement

### 19 Pompage optique

**a.** À $T = 300$ K, avec $E_2 - E_1 = 2{,}0$ eV $= 3{,}2.10^{-19}$ J, on a $\frac{N_2}{N_1} = 2{,}7.10^{-34}$

**b.** D'après le rapport $\frac{N_2}{N_1}$ précédent, on peut dire qu'à température ambiante, tous les atomes sont dans leur état fondamental d'énergie $E_1$. Il est donc nécessaire de leur apporter de l'énergie par pompage optique pour les placer dans un état excité et ainsi générer une lumière laser par émission stimulée.

### 20 Un laser pour refroidir les atomes

**1.a.** Il y a conservation de la quantité de mouvement donc l'absorption d'un photon donne à l'atome une quantité de mouvement, dirigée dans le même sens que celui du faisceau.

**b.** Comme l'atome n'a pas de quantité de mouvement initiale, la quantité de mouvement finale est également constante puisque le système {atome désexcité + photon} est isolé. Le photon étant émis dans une direction aléatoire avec une certaine quantité de mouvement, l'atome a, par conséquent, la quantité de mouvement opposée, dirigée aléatoirement.

**c.** L'excitation d'un atome placé dans un faisceau laser s'accompagne d'un gain de quantité de mouvement dans la direction et le sens du faisceau laser (réponse a). Lorsque cet atome se désexcite, il acquiert une quantité de mouvement dirigée aléatoirement. Statistiquement, sur plusieurs excitations-désexcitations, la quantité de mouvement de l'atome dans la direction et le sens du faisceau laser est toujours augmentée par les excitations, et le bilan des variations de quantité de mouvement lors des désexcitations est nul, donc l'atome est accéléré.

**d.** La valeur de la quantité de mouvement acquise lors de l'absorption d'un photon est $p = \frac{h}{\lambda}$ donc $p = 8{,}50.10^{-31}$ kg.m.s$^{-1}$ soit une variation de vitesse $v = p/m = 5{,}78.10^{-6}$ m.s$^{-1}$

**e.** En une seconde, l'augmentation de la vitesse est $10^8 v = 5{,}78.10^2$ m.s$^{-1}$et donc l'accélération moyenne sur une seconde est égale à $5{,}78.10^2$ m.s$^{-2}$.

**2.a.** Lorsque l'atome se dirige vers un laser, la fréquence de l'onde qu'il perçoit est plus grande que la fréquence émise du fait de l'effet Doppler.

**b.** Comme la fréquence émise du laser est légèrement inférieure à celle de la transition possible pour l'atome, lorsque l'atome se rapproche du laser, il peut percevoir une radiation de fréquence égale à la fréquence de sa transition. Par conséquent, les conditions peuvent être réunies pour qu'il absorbe un photon. Cette absorption lui communique une quantité de mouvement orientée dans le sens opposé au faisceau laser. Comme l'atome se dirigeait vers le laser, cette quantité de mouvement opposée fait qu'il ralentit. Si l'atome était presque immobile, il se peut qu'il soit conduit à repartir dans l'autre sens du fait de cette absorption. Dans ce cas, il se rapproche du laser situé en face ; il est donc, à son tour, ralenti par lui s'il atteint la vitesse suffisante pour que la fréquence perçue soit assez grande pour permettre l'absorption d'un photon.

**c.** L'atome est ralenti dans chacune des directions dans lesquelles il se dirige, donc son agitation thermique diminue et le dispositif permet ainsi d'obtenir des basses températures.

## Exercices de BAC

### 21 Autour d'un texte d'André Brahic

**1.a.** Les valeurs limites des longueurs d'onde dans le vide du spectre visible sont 400 nm (violet) et 800 nm (rouge).

**b.** $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$ avec $\lambda$ en mètre, $\nu$ en hertz et $c$ en m.s$^{-1}$.

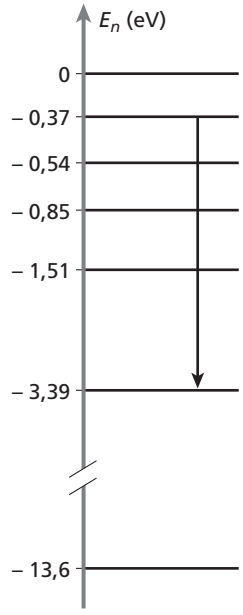
**c.** La longueur d'onde correspondante est, pour les micro-ondes : $\lambda_{\text{micro-ondes}} = 1{,}0.10^{-6}$ m
(ordre de grandeur : le micromètre).
Et pour les rayons X : $\lambda_X = 1{,}0.10^{-10}$ m
(ordre de grandeur : le dixième de nanomètre).
Comme l'énergie $E$ du photon associé à une radiation de fréquence $\nu$ est $E = h\nu$, l'énergie correspondant à la radiation est proportionnelle à sa fréquence ou inversement proportionnelle à sa longueur d'onde, donc l'énergie transportée par une radiation X est plus grande que celle transportée par une radiation dans le domaine des micro-ondes.

**2.** Le texte évoque le fait que l'énergie d'un atome est quantifiée.

**3.a.** Le niveau d'énergie de l'état fondamental de l'atome d'hydrogène est le plus bas, donc le niveau d'énergie – 13,6 eV.

**b.** $E_2 - E_1 = -3{,}39 - (-0{,}37) = -3{,}02$ eV
soit $-4{,}83.10^{-19}$ J.

**c.**




**d.** $E_1 - E_2 = h\nu$ donc $\nu = 7{,}29.1\ 014$ Hz. Il s'agit du passage d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie inférieure donc de l'émission d'un photon.

**4.a.** L'expérience de diffraction des électrons a permis de mettre en évidence la nature ondulatoire de cette particule (expérience de Davisson et Germer en 1927).

**b.** Relation de de Broglie : $\lambda = \dfrac{h}{p}$ avec $\lambda$ en mètre, $p$ en kg.m.s$^{-1}$ et $h$ en J.s.

**c.** La quantité de mouvement d'un tel électron est : $p = m_e v$. Donc la longueur d'onde associée est :

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = 2{,}08.10^{-8} \text{ m}$$

**d.** De par la conservation de l'énergie, l'électron voit sa vitesse diminuer.

### 22 Diffraction de ballons de foot

**a.** En présence du réseau de diffraction, on observe que les particules se répartissent de part et d'autre de la position centrale (entre – 150 µm et + 150 µm), c'est le même phénomène observé lors de la diffraction d'une onde lumineuse avec un écart angulaire $\theta$.

**b.** Les molécules de $C_{60}$ sont des particules (on voit d'ailleurs leurs impacts sur l'écran) mais dans certaines conditions, elles se comportent comme une onde puisqu'elles subissent un phénomène propre aux ondes, la diffraction.

**c.** La relation reliant $p$ à $\lambda$ est $p = \dfrac{h}{\lambda}$.

**d.** Une mole d'atomes de carbone 12 (et donc un nombre d'atomes de carbone égal au nombre d'Avogadro) pèse 12,0 g. Donc chaque atome de carbone pèse $\dfrac{12{,}0.10^{-3}}{6{,}02.10^{23}} = 1{,}99.10^{-26}$ kg.

Par conséquent la masse $m$ d'une molécule $C_{60}$ est égale à $m = \dfrac{60 \times 12{,}0.10^{-3}}{6{,}02.10^{23}} = 1{,}20.10^{-24}$ kg.

**e.** La quantité de mouvement de ces molécules est : $p = mv = 2{,}51.10^{-22}$ kg.m.s$^{-1}$.

**f.** La longueur d'onde associée est :
$\lambda = \dfrac{h}{p} = 2{,}64.10^{-12}$ m, valeur 1 000 fois plus petite que celle de la taille d'une molécule qui est de l'ordre du nanomètre ($10^{-9}$ m).

**g.** La demi-ouverture angulaire de la tache centrale de diffraction vérifie $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$.

**h.** Le calcul de la demi-ouverture angulaire de la tache centrale de diffraction donne $\theta = 2{,}64.10^{-5}$ rad. Par conséquent, la largeur $d$ de cette tâche, qui vérifie $\tan\theta = \dfrac{d/2}{D}$ vaut $d = 2D\tan\theta = 66{,}0$ µm. On retrouve bien le même ordre de grandeur que sur la **figure 2**.

## Rédiger une synthèse de documents

### 23 Entre théorie et technologie

*Analyse de la question*

Ce questionnement invite l'élève à reprendre des informations présentes dans l'ensemble du chapitre en focalisant sur deux mises en évidence :

- la nécessité d'admettre un postulat comme la dualité onde-particule,
- l'incessant aller-retour nécessaire et enrichissant entre théorie et expérience.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** D'après les extraits de la thèse de **de Broglie** (activité 1 p. 406), l'idée de la **dualité onde-particule** est d'abord une idée **théorique**, résultant d'une pure construction de la pensée à partir de théories préexistantes, en particulier celle de la dualité onde-corpuscule liée à la lumière.

**2.** Les **confirmations expérimentales** ont été nombreuses : la première provenant de l'expérience de Germer et Davisson sur la diffraction d'un faisceau de neutrons peut être citée pour son caractère historique évidemment. En outre, l'élève peut mettre en évidence le caractère très récent encore de certains travaux à ce sujet qui continuent de nourrir la théorie et éventuellement de l'affiner, comme l'expérience plus récente de l'équipe japonaise en 1999 qui a réussi à créer des interférences avec des molécules de fullerènes $C_{60}$.

**3.** Les **applications technologiques** de la physique quantique sont également très nombreuses : beaucoup permettent l'**analyse de la matière**, comme celle proposée dans l'activité 2 de ce chapitre mais également comme la microscopie à effet tunnel étudiée dans l'exercice 16 p 419, et nourrissent également la **théorie** en retour.

**4.** Aujourd'hui, la théorie est toujours aussi **étrange** pour le profane (voir le document 1 sur l'expérience de pensée du chat de Schrödinger p. 423) et pourtant les **recherches fondamentales** continuent sans cesse de nourrir les **progrès technologiques** (voir le document 2 p. 423 sur le métier de chercheur dans l'optique quantique).

# Chapitre 17 Enjeux énergétiques et chimie durable

## Introduction au chapitre (p. 426)

Ce chapitre est le premier de la partie *Agir*. Il s'intéresse à un enjeu mondial actuel : la gestion des ressources en énergie et en atomes de notre planète. Il s'agit ici d'amener l'élève à comprendre comment le physicien et le chimiste peuvent décrire ces ressources et contribuer à améliorer leur gestion.

Ce chapitre s'appuie sur des notions déjà abordées auparavant et introduit peu de connaissances nouvelles. Les notions de chaînes énergétiques vues en classe de Première S sont réinvesties. Il est nécessaire aussi de maîtriser les notions de bilans thermiques et de flux thermiques introduites au chapitre 15, Bilans thermiques. Du point de vue de la chimie, l'élève doit connaître l'écriture d'une équation de réaction avec des formules topologiques pour pouvoir interpréter les procédés de synthèses décrits dans ce chapitre. Enfin, la notion de catalyseur est une notion importante, qui a été vue dans le chapitre 11, Temps et évolution chimique.

Le programme ne fait apparaître aucune compétence expérimentale pour cette partie, c'est pourquoi aucun TP n'est proposé. En revanche, les compétences exigibles sont majoritairement du type « Extraire et exploiter des informations ». Aussi, les deux activités proposées s'appuient-elles sur des documents à exploiter.

Les élèves devront apprendre lors de ce chapitre :

- à exploiter une chaîne énergétique pour écrire un bilan d'énergie ou de puissance et comprendre sur quels paramètres il faut influer pour réaliser des économies d'énergie,
- à écrire un bilan d'atomes et à l'exploiter,
- à comprendre ce qu'est la valorisation d'un produit,
- à lister les différents axes d'amélioration d'un procédé de synthèse pour un meilleur respect de l'environnement.

## Activités

### 1 Synthèse de l'ibuprofène (p. 428)

#### *Objectif*

L'objectif de cette activité est de comparer deux procédés de synthèse industrielle de l'ibuprofène. Le premier, le procédé Boots, est le plus ancien. L'élève est amené à se rendre compte que ce procédé consomme beaucoup d'atomes qui finissent en pollution puisqu'une grande majorité des produits formés est non valorisable.

Au contraire, le nouveau procédé (BHC) ne forme que des produits valorisables (procédé économe en atomes) et fait appel à des catalyseurs qui permettent d'améliorer les vitesses de réaction à des températures peu élevées. Le travail de l'élève consiste, dans cette activité, à exploiter les étapes des deux voies de synthèses écrites à l'aide des formules topologiques. Il s'agit donc d'écrire un bilan de toutes les étapes à l'aide de formules brutes, puis de compléter un tableau de bilan d'atomes et d'utiliser ce tableau pour comparer quantitativement les deux procédés (voir lien utile **1**).

#### *Correspondance avec le programme*

Extraire et exploiter des informations en lien avec la chimie durable pour comparer les avantages et les inconvénients de procédés de synthèse du point de vue du respect de l'environnement.

#### *Corrigé*

**a.** Procédé Boots :

$C_{10}H_{14} + C_4H_6O_3 + C_2H_5ONa + C_4H_7O_2Cl + H_3O^+ + NH_2OH \rightarrow C_{13}H_{18}O_2 + C_2H_4O_2 + C_2H_6O + NaCl + H^+ + C_3H_6O_3 + NH_3$

Procédé BHC :

$C_{10}H_{14} + C_4H_6O_3 + H_2 + CO \rightarrow C_{13}H_{18}O_2 + C_2H_4O_2$

**b.** On définit les sommes des masses molaires atomiques $M$ pour les atomes introduits, $M_V$ pour les atomes des produits valorisables et $M_{NV}$ pour les atomes des produits non valorisables.

Bilan d'atomes Boots :

| | C | H | O | N | Cl | Na | Somme des masses atomiques |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Réactifs | 20 | 38 | 8 | 1 | 1 | 1 | $M = 20\ M(C) + 38$ x $M(H) + 8$ x $M(O) + M(N) + M(Cl) + M(Na)$<br>$M = 20 \times 12{,}0 + 38 \times 1{,}0 + 8 \times 16{,}0 + 14{,}0 + 35{,}5 + 23{,}0 = 478{,}5$ g.mol$^{-1}$ |
| Produits valorisables | 15 | 22 | 4 | 0 | 0 | 0 | $M_v = 15 \times M(C) + 22 \times M(H) + 4 \times M(O)$<br>$M_v = 15 \times 12{,}0 + 22 \times 1{,}0 + 4 \times 16{,}0 = 266{,}0$ g.mol$^{-1}$ |
| Produits non valorisables | 5 | 16 | 4 | 1 | 1 | 1 | $M_{NV} = 5 \times M(C) + 16 \times M(H) + 4 \times M(O) + M(N) + M(Cl) + M(Na)$<br>$M_{NV} = 5 \times 12{,}0 + 16 \times 1{,}0 + 4 \times 16{,}0 + 14{,}0 + 35{,}5 + 23{,}0 = 212{,}5$ g.mol$^{-1}$ |

Bilan d'atomes BHC :

| | C | O | H | Somme des masses atomiques |
|---|---|---|---|---|
| Réactifs | 15 | 4 | 22 | $M = 15 \times M(C) + 22 \times M(H) + 4 \times M(O)$<br>$M = 15 \times 12{,}0 + 22 \times 1{,}0 + 4 \times 16{,}0 = 266{,}0$ g.mol$^{-1}$ |
| Produits valorisables | 15 | 4 | 22 | $M_v = 15 \times M(C) + 22 \times M(H) + 4 \times M(O)$<br>$M_v = 15 \times 12{,}0 + 22 \times 1{,}0 + 4 \times 16{,}0 = 266{,}0$ g.mol$^{-1}$ |
| Produits non valorisables | 0 | 0 | 0 | |

Le procédé BHC est donc beaucoup plus économe en atomes. Tous les atomes sont valorisés.

**c.** Le procédé BHC ne fait apparaître que des étapes catalysées, ce qui n'est pas le cas du procédé Boots. C'est donc bien le procédé le plus respectueux de l'environnement.

**d.** Le procédé Boots se fait en six étapes. Le rendement global serait donc de $0{,}90^6 = 0{,}53$ soit 53 %. Le procédé BHC ne comporte que trois étapes. Le rendement serait donc de $0{,}90^3 = 0{,}73$ soit 73 %.

**e.** D'après la question précédente, 1,0 mol de 2-méthylpropylbenzène forme 0,53 mol d'ibuprofène selon le procédé Boots ou 0,73 mol selon le procédé BHC. On veut former 13 000 t d'ibuprofène : soit $n_{Ib}$ la quantité de matière d'ibuprofène, $m_{Ib}$ la masse d'ibuprofène et $M_{Ib}$ sa masse molaire. On a :

$$n_{Ib} = \frac{m_{Ib}}{M_{Ib}} \text{ soit } n_{Ib} = \frac{13\ 000.10^6}{206{,}0} = 6{,}311.10^7 \text{ mol}$$

Avec le procédé Boots, en tenant compte du rendement, il faut $\frac{6{,}311.10^7}{0{,}53} = 1{,}2.10^8$ mol de réactifs.

Soit $n_{MPB}$ la quantité de matière de 2-méthylpropylbenzène, $m_{MPB}$ la masse de 2-méthylpropylbenzène et $M_{MPB}$ sa masse molaire. On a : $m_{MPB} = n_{MPB}\ M_{MPB}$

$m_{MPB} = 1{,}2.10^8 \times 134{,}0 = 1{,}6.10^{10}$ g $= 1{,}6.10^4$ t de réactifs.

Avec le procédé BHC, en tenant compte du rendement, il faut $\frac{6{,}311.10^7}{0{,}73} = 8{,}6.10^7$ mol de réactifs.

Soit $m_{MPB} = n_{MPB}\ M_{MPB}$

$m_{MPB} = 8{,}6.10^7 \times 134 = 1{,}2.10^{10}$ g $= 1{,}2.10^4$ t.

Le procédé BHC nécessite une masse plus petite de réactifs : c'est donc le procédé le plus économique.

**f.** La masse de produits non valorisables $m_{NV}$ pour $m_{Ib} = 1$ t d'ibuprofène est donnée par :

$$\frac{m_{NV}}{M_{NV}} = \frac{m_{Ib}}{M_{Ib}} \text{ soit } m_{NV} = \frac{M_{NV}\ m_{Ib}}{M_{Ib}}.$$

Pour le procédé Boots, $m_{NV} = \frac{212{,}5 \times 1}{206{,}0} = 1$ t (autant que d'ibuprofène).

Le procédé BHC ne forme pas de produits non valorisables.

## 2 Une innovation suédoise (p. 430)

### *Objectif*

L'objectif de cette activité est d'extraire des informations d'un article en anglais et d'un histogramme sur un procédé innovant en matière d'économie d'énergie puisqu'il évoque le chauffage d'un bâtiment grâce à l'énergie dégagée par les voyageurs qui transitent dans la gare voisine.

Il s'agit ici de réinvestir la notion de chaîne énergétique vue en classe de Première S et de comprendre comment fonctionne le dispositif du point de vue des transferts d'énergie.

Les élèves devront donc lire le texte en anglais pour répondre à différentes questions puis utiliser une chaîne énergétique pour dresser un bilan de puissance. Enfin, ils devront utiliser les données d'un histogramme pour comparer le réservoir d'énergie que représentent les voyageurs transitant par la gare à un autre réservoir d'énergie : les sportifs d'une salle de gymnastique.

### *Correspondance avec le programme*

• Extraire et exploiter des informations sur des réalisations ou des projets scientifiques répondant à des problématiques énergétiques contemporaines.

• Les supports d'informations sont diversifiés : texte en langue étrangère, graphe.

• Argumenter sur l'économie d'énergie réalisée.

### *Corrigé*

**a.** « Your average human generates about 60 watts just lying on the sofa, and about 100 watts hustling for the train during rush hour. »
(Un être humain fournit environ 60 watts en étant simplement couché sur un canapé, et environ 100 watts en se bousculant pour prendre le train aux heures de pointe.)

**b.** L'énergie convertie par le corps humain provient de l'alimentation conjuguée à la respiration.

**c.** Puisque l'échangeur est modélisé par un convertisseur d'énergie, il y a autant d'énergie entrante que d'énergie sortante et donc : $P_2 = P_3 + P_4$.

**d.** L'eau de l'échangeur voit sa température diminuer après son passage dans le bâtiment. Il est donc possible de la renvoyer vers la gare pour qu'elle se réchauffe au contact de l'échangeur de chaleur.

**e.** Il faut ajouter le lac avec une flèche de l'échangeur de chaleur vers le lac et inverser les flèches correspondant à $P_3$ et $P_2$.

**f.** Le texte fait état de 250 000 personnes qui libèrent chacune 100 W pendant 5 minutes. La gare est donc un réservoir de $2{,}5.10^5 \times 100 \times (5 \times 60) = 8.10^9$ J. Le nombre $N$ de personnes venant 1 h dans la salle de gymnastique (libérant 400 W) doit donc être :

$$N = \frac{8.10^9}{400 \times 60 \times 60} = 6.10^3 \text{ personnes.}$$

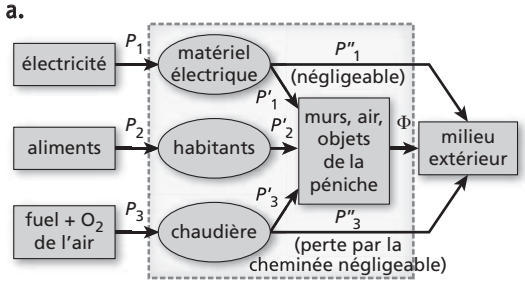
C'est approximativement dix fois plus que la fréquentation quotidienne d'une salle de gymnastique.
Le procédé utilisé pour chauffer le Kungsbrohuset pourrait donc être généralisé, mais pour chauffer des bâtiments dix fois moins grands.

# Exercices

## Applications

### 1 Chauffage d'une péniche

**a.**




**b.** $P_1 + P_2 + P_3 = \Phi$

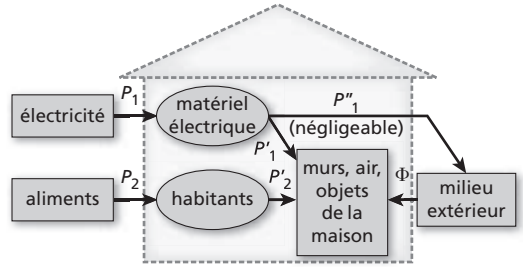
**c.** $P_3 = \Phi - (P_1 + P_2)$

$P_3 = 25 - 1 = 24$ kW

### 2 Maison pendant la canicule

**a.** Les différents systèmes échangeant de l'énergie avec la maison sont : les habitants, les appareils électriques et l'environnement extérieur (la flèche est dirigée de l'environnement vers la maison car en été, le transfert thermique est dans ce sens).

La chaine énergétique en été est donc :




**b.** La maison reçoit les puissances $P_1$, $P_2$ et $\Phi$. Comme elle ne cède son énergie à aucun système, la maison emmagasine l'énergie donc sa température ne peut que s'élever.

### 3 Moins charger sa voiture

**a.** le système chimique {carburant + air} fournit l'énergie mécanique d'une voiture.

**b.** L'énergie cinétique de la voiture est $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ où $m$ est la masse de la voiture et $v$ sa vitesse.

**c.**
$$\frac{E_c(A)}{E_c(B)} = \frac{\frac{1}{2}m_A v^2}{\frac{1}{2}m_B v^2} = \frac{m_A}{m_B} = \frac{m_A}{m_A + 100}$$

$$\frac{E_c(A)}{E_c(B)} = \frac{1\,600}{1\,600 + 100} = 0{,}9412.$$

**d.** L'énergie est dissipée pour vaincre les frottements que l'air exerce sur la voiture.

**e.** Lors de l'accélération, l'énergie du moteur est dissipée à la fois pour vaincre les frottements exercés par l'air sur la voiture, mais également pour créer l'énergie cinétique de la voiture.

**f.** Si les frottements exercés par l'air sur les voitures sont les mêmes, la différence de consommation est liée à la phase d'accélération puisqu'il faut fournir plus d'énergie pour augmenter la vitesse de la voiture la plus lourde.

### 4 Couper le moteur d'une voiture à l'arrêt

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 639.*

### 5 Fenêtre de chambre

**a.** En notant le flux thermique $\Phi$, la température la plus grande $T_2$, la température la plus petite $T_1$ et la résistance thermique de la paroi $R_{th}$, on a :

$$\Phi = \frac{T_2 - T_1}{R_{th}}$$

**b.** Avec l'expression précédente, calculons $\Phi_F$ le flux thermique à travers la fenêtre :

$$\Phi_F = \frac{20 - 4}{0{,}074} = 2{,}2.10^2 \text{ W}$$

**c.** Avec la même expression calculons $\Phi_M$ le flux thermique à travers le mur :

$$\Phi_M = \frac{20 - 4}{0{,}24} = 67 \text{ W}$$

**d.** Soit $\Phi_C$ le flux thermique total à travers les parois de la chambre : $\Phi_C = \Phi_M + \Phi_F$

$$\Phi_C = 2{,}2.10^2 + 67 = 2{,}9.10^2 \text{ W.}$$

Le nombre $N$ de lampes à allumer est :

$$N = \frac{\Phi_C}{P} \text{ soit } N = \frac{2{,}9.10^2}{14} = 21 \text{ lampes.}$$

Il est rare d'allumer 21 lampes en permanence dans une chambre ; cette chambre doit donc être équipée d'un radiateur.

**e.** Les quatre enfants développent ensemble $4 \times 90 = 360$ W, ce qui est supérieur aux pertes d'énergie. Même sans lampe et sans radiateur, la température de la pièce va augmenter.

### 6 Synthèse de la phénacétine

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 639.*

## Entraînement

### 7 Rouler moins vite

**a.** Le temps de roulage est : $\Delta t = \frac{d}{v}$ avec $d$ la distance parcourue et $v$ la vitesse du véhicule.

À 130 km.h$^{-1}$, $\Delta t = \frac{400}{130} = 3{,}08$ h soit 3 h 05 min.

Il y aura une pause de 15 minutes : le voyage va donc durer 3 h 20 min.

À 110 km.h$^{-1}$, $\Delta t = \frac{400}{110} = 3{,}64$ h soit 3 h 38 min.

Il y aura une pause de 15 minutes : le voyage va donc durer 3 h 53 min soit 33 minutes de plus que pour l'autre voiture. (La durée est allongée de 16 %)

**b.** D'après le graphique :

• à 130 km.h$^{-1}$, la voiture consomme 6,0 L/100 km. Au total, elle va donc consommer $4{,}00 \times 6{,}0 = 24$ L.

• à 110 km.h$^{-1}$, la voiture consomme 4,7 L/100 km. Au total, elle va donc consommer $4{,}00 \times 4{,}7 = 19$ L.

La réduction de la vitesse économise 5 L de carburant soit 21 % d'économie.

**c.** À 130 km.h$^{-1}$, on consomme 24 L d'essence donc on rejette $24 \times 2{,}4 = 58$ kg de $CO_2$.

À 110 km.h$^{-1}$, on consomme 19 L d'essence donc on rejette $19 \times 2{,}4 = 46$ kg de $CO_2$.

La réduction de la vitesse évite le rejet de 12 kg de $CO_2$, soit 21 % en moins.

### 8 Garder une vitesse constante

**a.** Voir la **figure 7** du cours p. 433.

**b.** P roule sur une route plate (pas de variation d'énergie potentielle) et sans changer de vitesse (pas de variation d'énergie cinétique). L'énergie consommée compense d'une part les frottements dus au contact, principalement avec l'air et, d'autre part, transfère de l'énergie thermique à l'environnement (échauffement du moteur).

**c.** Dans la phase d'accélération, il y a la même énergie consommée pour compenser les frottements et transférée par voie thermique mais il faut aussi ajouter l'énergie nécessaire à l'augmentation de la vitesse du véhicule (création d'énergie cinétique).

**d.** L'énergie nécessaire à l'accélération est :

$$E_{c_{120}} - E_{c_{80}} = \frac{1}{2} m (v_{J2}^2 - v_{J1}^2)$$

avec $m$ la masse du véhicule, $E_{c_{120}}$ l'énergie cinétique à 120 km.h$^{-1}$ et $E_{c_{80}}$ l'énergie cinétique à 80 km.h$^{-1}$.

$$E_{c_{120}} - E_{c_{80}} = 0{,}5 \times 750 \times \left[ \left( \frac{120}{3{,}6} \right)^2 - \left( \frac{80}{3{,}6} \right)^2 \right] = 0{,}23 \text{ MJ.}$$

**e.** La consommation correspondante est :

$$\frac{0{,}23}{35} = 6{,}6.10^{-3} \text{ L}$$

**f.** Lors du freinage, l'énergie est dissipée par frottements sur les disques de freins et n'est pas récupérée. Les freins s'échauffent et refroidissent ultérieurement, l'énergie est transférée à l'environnement.

**g.** Le voyage de 100 km dure une heure.

**h.** Les 30 phases d'accélération consomment $30 \times 6{,}6.10^{-3} = 0{,}20$ L. Si le véhicule consomme 5 L aux 100 km, cette conduite provoque 4 % de consommation supplémentaire.

## 9 Double vitrage

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

## 10 Production de diisocyanate

**a.** Procédé 1

| | C | H | Cl | N | O |
|---|---|---|---|---|---|
| Réactifs | 9 | 10 | 4 | 2 | 2 |
| Produits valorisables | 9 | 6 | 0 | 2 | 2 |
| Produits non valorisables | 0 | 4 | 4 | 0 | 0 |

Procédé 2

| | C | H | N | O |
|---|---|---|---|---|
| Réactifs | 9 | 10 | 2 | 4 |
| Produits valorisables | 9 | 6 | 2 | 2 |
| Produits non valorisables | 0 | 4 | 0 | 2 |

Le deuxième procédé est le plus économe en atomes.

**b.** Prodédé 1 : $\text{UA} = \dfrac{M_{TDI} \times 100}{M_{TDI} + 4 \times M_{HCl}}$

$$\text{UA} = \frac{174 \times 100}{174 + 4 \times (1{,}0 + 35{,}5)} = 54{,}4\ \%.$$

Prodédé 2 : $\text{UA} = \dfrac{M_{TDI} \times 100}{M_{TDI} + 2 \times M_{H_2O}}$

$$\text{UA} = \frac{174 \times 100}{174 + 2 \times (2 \times 1{,}0 + 16{,}0)} = 82{,}9\ \%.$$

(voir lien utile **2**)

**c.** La réaction idéalement économe en atomes aurait une UA de 100 %. Le procédé 2 est donc bien le plus économe en atomes.

**d.** Le procédé 2 utilise du dioxyde de carbone à la place du phosgène : c'est un réactif moins dangereux.

**e.** Le second procédé est un moyen de valoriser le dioxyde de carbone parce qu'il utilise le dioxyde de carbone comme réactif dans un procédé industriel : les atomes qui le constituent sont utilisés, ce qui est un des aspects de la valorisation de $CO_2$.

## 11 Diatomées

**a.** À 2 000 °C, les molécules organiques ou biologiques sont dégradées.

**b.** Les deux procédés se font dans l'eau, sans chauffage.

**c.** Équation chimique globale :

$$Si + 2Cl_2 + 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 4HCl.$$

| | H | Cl | O | Si |
|---|---|---|---|---|
| Réactifs | 4 | 4 | 2 | 1 |
| Produits valorisables | 0 | 0 | 2 | 1 |
| Produits non valorisables | 4 | 4 | 0 | 0 |

Le bilan d'atomes fait apparaître de nombreux atomes non valorisables. La fabrication de silice coûte donc assez cher.

**d.** La fusion se fait à haute température : le bilan énergétique n'est donc pas bon.

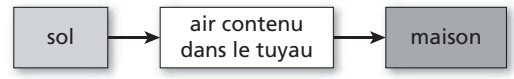
## 12 Le puits canadien

**I.a.** La température à 2 m de profondeur (7 °C) est plus élevée qu'au niveau du sol (3 °C).

**b.** Le gain en température est important jusqu'à 4 m de profondeur. Pour des profondeurs supérieures, la température stagne (elle continue en fait d'augmenter lentement, de 0,04 °C par mètre) : le gain en température est négligeable.

(voir liens utiles **3**, **4** et **5**)

**c.**




**d.** La température maximale en sortie du tuyau sera celle du sol (10 °C).

**II.1.a.** $V = \pi R^2 x$

$V = 3{,}14 \times (6{,}0.10^{-2})^2 \times x = 1{,}1.10^{-2}\ x$ en $m^3$.

**b.** $m_{air} = \rho V$

$m_{air} = 1{,}3 \times 1{,}1.10^{-2}\ x = 1{,}4.10^{-2}\ x$ en kg.

**c.** L'air entre à 3,0 °C et ressort à 9,0 °C : l'augmentation de température est de 6,0 °C.
Il faut donc $E = 1\ 000 \times (T_S - T_E) \times m_{air}$
avec $T_S$ la température de sortie d'air et $T_E$ la température à l'entrée de l'air.
$E = 1\ 000 \times 6{,}0 \times 1{,}4.10^{-2} \times x = 84x$ en J.

**2.a.** $S = 2\pi Rx$

$S = 2 \times 3{,}14 \times 6{,}0.10^{-2} \times x = 3{,}8.10^{-1}\, x$ en $m^2$.

**b.** $R_{th} = \dfrac{r}{S}$

$R_{th} = \dfrac{2{,}0.10^{-2}}{3{,}8.10^{-1}x} = \dfrac{5{,}3.10^{-2}}{x}$ $K^{-1}.W^{-1}$.

$\Phi = \dfrac{T_2 - T_1}{R_{th}}$

$\Phi = \dfrac{3{,}0}{\dfrac{2{,}0.10^{-2}}{3{,}8.10^{-1}x}} = 57x$ en W

**c.** $\Delta t = \dfrac{x}{v} = \dfrac{x}{4{,}0}$

**d.** $E = \Phi \times \Delta t$

$E = 57x \times \dfrac{x}{4{,}0} = 14x^2$ en J.

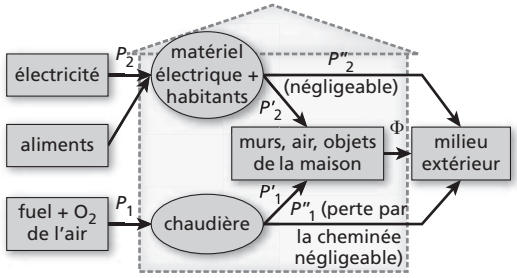
**3.a.** $84x = 14x^2$ donc $x = \dfrac{84}{14} = 6{,}0$ m.

**III.** En été, l'air chaud de l'extérieur est refroidi par le sol et c'est donc un air frais qui est injecté dans la maison ! L'intérêt est de climatiser la maison sans avoir à apporter d'énergie.

## Exercices de bac

### 13 Bilan énergétique d'une maison

**a.** Chaîne énergétique :




Bilan thermique : $P_1 + P_2 = \Phi$.

**b.** $P_2 = 5 \times P_{habitant} + P_{réfrigérateur} + 2P_{ordinateur} + 10P_{lampes\ basse\ consommation} + P_{TV} + 2P_{halogène} + P_{plaque\ cuisson}$

$P_2 = 5 \times 50 + 100 + 2 \times 120 + 10 \times 20 + 60 + 2 \times 300 + 1\,500 = 3{,}0$ kW.

**c.** Trois zones de températures distinctes apparaissent sur la thermographie : les murs, les toits et les fenêtres. La température est plus élevée sur les fenêtres. C'est donc à cet endroit que l'énergie est le plus transmise de l'intérieur vers l'extérieur. La résistance thermique surfacique y est donc la plus faible : elle correspond pour les fenêtres à $r_1 = 0{,}50$ $m^2.°C.W^{-1}$.

Avec un raisonnement analogue, la résistance thermique des murs est $r_2 = 3{,}0$ $m^2.°C.W^{-1}$ et celle du toit $r_3 = 5{,}0$ $m^2.°C.W^{-1}$.

**d.** $\Phi = \Phi_{fenêtres} + \Phi_{toit} + \Phi_{murs}$

$= S_1 \times \dfrac{T_2 - T_1}{r_1} + S_2 \times \dfrac{T_2 - T_1}{r_2} + S_3 \times \dfrac{T_2 - T_1}{r_3}$

Pour une température $T_2 = 22$ °C :

$\Phi = 40 \times \dfrac{22 - (-5)}{0{,}50} + 150 \times \dfrac{22 - (-5)}{3{,}0} + 170 \times \dfrac{22 - (-5)}{5{,}0}$

$= 4{,}4$ kW.

Pour une température $T_2 = 16$ °C :

$\Phi = 40 \times \dfrac{16 - (-5)}{0{,}50} + 150 \times \dfrac{16 - (-5)}{3{,}0} + 170 \times \dfrac{16 - (-5)}{5{,}0}$

$= 3{,}4$ kW.

**e.** D'après le bilan thermique : $P_1 + P_2 = \Phi$.

D'où $P_1 = \Phi - P_2$.

Pour une température $T_2 = 22$ °C :

$P_1 = 4{,}4$ kW $- 3{,}0$ kW $= 1{,}4$ kW.

Pour une température $T_2 = 16$ °C :

$P_1 = 3{,}4$ kW $- 3{,}0$ kW $= 0{,}4$ kW.

**f.** Chauffer sa maison à 16 °C au lieu de 22 °C la nuit permet de diminuer de façon très importante la consommation d'énergie et donc le coût de chauffage.

### 14 Partir en vacances à Nice

**1.a.** $2C_{12}H_{26} + 37O_2 \rightarrow 24\ CO_2 + 26H_2O$

**b.** Pour effectuer le trajet de 700 km, il faut $0{,}66 \times 7{,}00 = 4{,}6$ t de kérosène et, en tenant compte du décollage qui consomme 4,6 t d kérosène, il faut une masse totale de $4{,}6 + 4{,}6 = 9{,}2$ t soit une quantité de matière $n_K = \dfrac{m_K}{M_K}$

$$n_K = \frac{9{,}2.10^6}{170{,}0} = 5{,}4.10^4 \text{ mol.}$$

**c.** La combustion d'une mole de kérosène produit 7,3 MJ.

Pour effectuer le déplacement, l'énergie consommée est donc :

$$E = 7{,}3.10^6 \times 5{,}4.10^4 = 4{,}0.10^{11} \text{ J.}$$

**d.** Il y a 150 voyageurs soit :

$$\frac{4{,}0.10^{11}}{150} = 2{,}6.10^9 \text{ J/voyageur.}$$

**e.** La masse $m_K$ de kérosène contient la masse de carbone $m_C = m_K \times 12 \times \frac{M_C}{M_K}$

$$m_C = m_K \times 12 \times \frac{12,0}{170} = 0,847\ m_K.$$

Cette masse produit :

$$m_{CO_2} = m_C \times \frac{44,0}{12,0} = 0,847\ m_K \times \frac{44,0}{12,0} = 3,11\ m_K$$
$$= 3,11 \times 9,2 = 29\ \text{t}$$

Par voyageur, ceci équivaut à $\frac{29}{150} = 0,19$ t de $CO_2$ émis.

**2.a.** La voiture consomme 6,0 L pour faire 100 km donc pour faire les 950 km, il faut $6,0 \times 9,50 = 57$ L de gasoil.

Or $m_{gasoil} = \rho_{gasoil} \times V = 0,85 \times 57 = 48$ kg.

**b.** Comme la combustion d'un kilogramme de gasoil produit 44,8 MJ, pour faire le trajet on a consommé :

$$44,8.10^6 \times 48 = 2,2.10^9\ \text{J}.$$

**c.** Comme la combustion d'un kilogramme de gasoil produit 3,2 kg de $CO_2$, pour faire le trajet on a produit :

$$3,2 \times 48 = 1,5.10^2\ \text{kg de } CO_2.$$

**3.a.** Pour faire le déplacement, le TGV a consommé :

$$3,2.10^8 \times 950 = 3,0.10^{11}\ \text{J}.$$

Le TGV transportant 1 100 personnes, la consommation énergétique par voyageur est :

$$\frac{3,0.10^{11}}{1100} = 2,8.10^8\ \text{J/voyageur}.$$

**b.** Compte-tenu de l'énoncé, la réponse attendue peut-être :

Le TGV fonctionne à l'électricité, il n'émet donc pas directement de dioxyde de carbone.

Cependant, cette question peut être l'occasion d'aborder avec les élèves l'origine de l'électricité.

En France, l'électricité étant pour 10 % d'origine fossile, il a nécessairement fallu émettre du dioxyde de carbone pour fabriquer un dixième de l'électricité utilisée par le TGV.

**4.**

| | Avion | Voiture | TGV |
|---|---|---|---|
| Énergie par voyageur | $2,6.10^9$ J | $2,2.10^9$ J | $2,8.10^8$ J |
| Masse de $CO_2$ émise par voyageur | $1,9.10^2$ kg | $1,5.10^2$ kg | 0 |

On remarque que le TGV consomme beaucoup moins d'énergie que l'avion ou la voiture et n'émet pas de dioxyde de carbone de manière directe. Ce n'est pas le cas de toutes les locomotives : les lignes non électrifiées sont parcourues par des locomotives équipées d'un moteur diesel (émettant du $CO_2$), de même que les locomotives de manœuvre.

### 15 Le $CO_2$ comme carburant

**a.** $CO_2 + 3H_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$

**b.**

| | C | H | O |
|---|---|---|---|
| Réactifs | 1 | 6 | 2 |
| Produits valorisables | 1 | 4 | 1 |
| Produits non valorisables | 0 | 2 | 1 |

**c.** $CO + 2H_2 \rightarrow CH_3OH$

**d.**

| | C | H | O |
|---|---|---|---|
| Réactifs | 1 | 4 | 1 |
| Produits valorisables | 1 | 4 | 1 |
| Produits non valorisables | 0 | 0 | 0 |

**e.** La réaction la plus économe en atomes est celle qui produit le moins de déchets non valorisables : c'est donc la seconde.

**f.** Un catalyseur est une espèce chimique, différente des réactifs, qui réduit la durée de la réaction sans pour autant entrer dans le bilan. Il permet de moins chauffer le milieu réactionnel, et, à ce titre, économise l'énergie apportée au système réactionnel, ou bien il favorise des réactions qui seraient bien trop lentes pour être exploitables. Dans le cas présent, le catalyseur développé permet la réduction de $CO_2$ en CO, réaction importante qui permet d'exploiter la réaction entre CO et $H_2$ dont le bilan en atomes est bon.

**g.** Les deux procédés évoqués considèrent le dioxyde de carbone comme réactif. Ce sont donc bien des procédés de valorisation du $CO_2$.

## Rédiger une synthèse de documents

### 16 Valorisation du dioxyde de carbone

*Analyse de la question*

Le sujet demande de développer la notion de valorisation d'un produit chimique en comparant par exemple l'utilisation et la synthèse du dioxyde de carbone comme solvant par rapport à un autre solvant.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Rappeler la définition de la valorisation donnée dans le cours

**2.** Mentionner que l'utilisation de $CO_2$ comme solvant d'extraction de la caféine rentre dans la définition de la valorisation :

- comment $CO_2$ peut être fluide (solvant d'extraction),
- comment $CO_2$ et la caféine peuvent être séparés.

**3.** Décliner l'intérêt de cette utilisation de $CO_2$ :

- le dioxyde de carbone est un solvant présentant **moins de dangers** pour le personnel impliqué dans le procédé industriel, pour le consommateur et pour l'environnement,
- il permet l'extraction de la caféine, facilement séparée par ce solvant, et ainsi sa **récupération,**
- ce solvant peut être réutilisé pour **plusieurs extractions successives**, ce qui est un gage d'économie d'atomes (voir lien utile **6**).

## LIENS UTILES

**1** http://culturesciences.chimie.ens.fr/node/787

**2** http://culturesciences.chimie.ens.fr/dossiers-chimie-societe-article-Utilisation_Atomique_Demirdjian.html#Trost

**3** http://www.geothermie-perspectives.fr/07-geothermie-france/01-tres-basse-energie.html

**4** http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-180.html

**5** http://www.apere.org/manager/docnum/doc/doc537_1929-Ener_sol_avec_PAC.pdf

**6** http://www.sweetmarias.com/decaf.co-2method.html

Chapitre 18

# Dosages par étalonnage

## Introduction au chapitre (p. 448)

Ce chapitre présente, pour la première fois, aux élèves le principe et l'intérêt des dosages, techniques très utilisées par les chimistes pour effectuer des contrôles de qualité. Dans ce chapitre, seuls les dosages par étalonnage sont étudiés. Le chapitre 19, quant à lui, décrira les dosages par titrage, c'est-à-dire impliquant une réaction chimique. Comme l'indique le programme, deux types de dosages par étalonnage sont introduits : ceux utilisant la spectrophotométrie (avec mesure d'une absorbance) et ceux utilisant la conductimétrie (avec mesure de la conductance ou de la conductivité).

Dans tous les cas, les exemples ont été pris, comme le recommande le programme, dans le domaine de la santé, de l'environnement et du contrôle de la qualité. Ainsi, cela permet de montrer concrètement comment les dosages permettent de contrôler et d'aider au respect de l'environnement.

Dans la mesure où ce chapitre est très expérimental, nous insistons sur les précautions expérimentales à prendre tout en essayant de faire réfléchir les élèves sur l'intérêt des différentes étapes des protocoles.

De plus, ce chapitre se prête bien au travail sur les notions de mesures et d'incertitudes.

Que ce soit dans les activités ou dans les exercices, nous avons ainsi développé les réflexions sur certaines notions présentées dans le chapitre d'introduction : calculs d'incertitudes et intervalles de confiance, réflexions sur les différentes sources d'erreurs, tracés et modélisations de courbes d'étalonnage, etc.

Concernant l'utilisation des courbes d'étalonnage, nous avons essayé de varier les méthodes de tracé (manuel sur papier millimétré ou en utilisant un tableur grapheur), ainsi que les méthodes d'exploitation de la courbe (détermination graphique ou utilisation de l'équation de la droite de régression), en s'appuyant dans chaque cas sur les fiches méthodes présentes à la fin du manuel de l'élève (voir la fiche méthode 2 p. 606 et la fiche méthode 7 p. 612 du manuel de l'élève).

Au niveau théorique, les deux lois sous-jacentes aux techniques de dosages sont celle de Beer-Lambert pour la spectrophotométrie et celle de Kohlrausch pour la conductimétrie. Si la première est connue des élèves depuis la classe de Première S et révisée au début de l'année de Terminale dans le chapitre 4, la seconde est introduite expérimentalement (Activité 1 p. 450), puis étudiée par analogie avec la spectrophotométrie. En effet, dans les deux cas, il ne s'agit que d'une relation de proportionnalité entre la grandeur mesurée (absorbance ou conductivité ou conductance) et la concentration d'une espèce chimique dosée. Dans ce chapitre, la loi de Kohlrausch est nécessaire seulement dans le cas d'un soluté ionique unique. Néanmoins, nous avons choisi d'introduire dans le cours et d'utiliser dès à présent la loi plus générale $\sigma = \Sigma \lambda_i \, [\text{ion}]_i$ qui sera nécessaire à l'interprétation de l'allure des courbes de titrage dans le chapitre suivant.

## Activités

### 1 Mesures conductimétriques (p. 450)

#### *Objectif*

Cette activité permet tout d'abord de familiariser les élèves avec l'utilisation d'un nouvel appareil, le conductimètre, et les grandeurs qu'il permet de mesurer, à savoir la conductivité $\sigma$ ou la conductance $G$.

La première partie aborde les conditions expérimentales d'utilisation de cet appareil (grâce aux aides proposées dans l'activité), le rôle de l'étalonnage de cet appareil, ainsi que le lien de proportionnalité existant entre les deux grandeurs $G$ et $\sigma$.

L'étude de solutions de chlorure de calcium permet ensuite de comprendre le principe d'un dosage par étalonnage sur un exemple simple. L'élève est amené à préparer une gamme d'étalonnage par dilutions puis à tracer et exploiter une courbe d'étalonnage.

L'analyse de cette courbe permet également d'introduire la loi de Kohlrausch qui exprime la proportionnalité entre $G$ et la concentration molaire d'un électrolyte dans le cas d'un soluté ionique unique.

### *Correspondance avec le programme*

Conductimétrie. Explication qualitative de la loi de Kohlrausch.

### *Liste de matériel*

- Un conductimètre affichant la conductance $G$ avec son électrode et leur support (plus la notice).
- Quatre fioles jaugées de 100 mL.
- Une poire d'aspiration.
- Des pipettes jaugées de 5 mL, 10 mL, 20 mL et 25 mL.
- Des béchers.
- Un thermomètre (pour l'étalonnage, il est bien de connaître la température).

### *Liste des produits*

- Une solution de référence (environ 50 mL par binôme) avec les valeurs de sa conductivité en fonction de la température (par exemple, solution de chlorure de potassium de concentration 0,100 mol.L$^{-1}$ ; $\sigma_{ref} = 1{,}50$ S.m$^{-1}$ à 25 °C).
- Une solution mère $S_0$ de chlorure de calcium de concentration voisine de $4{,}00.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$ (environ 50 mL par binôme).

- Une solution inconnue S de chlorure de calcium de concentration voisine de $6{,}00.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$ (environ 50 mL par binôme) (soit dans la gamme des concentrations des solutions étalons proposées dans l'activité).

- Une pissette d'eau distillée.

### *Corrigé*

**1.a.** $k = \dfrac{\sigma_{réf}}{G}$.

La valeur de $k$ dépend de l'électrode utilisée.
Exemple à titre indicatif, pour une solution de chlorure de potassium à 0,100 mol.L$^{-1}$ :

$G = 3{,}7.10^{-3}$ S donc $k = \dfrac{1{,}50}{3{,}7.10^{-3}} = 4{,}0.10^{2}$ m$^{-1}$.

**b.** $\sigma_S = kG_S$.

Exemple à titre indicatif :

$G_S = 4{,}0.10^{-4}$ S donc

$\sigma_S = 4{,}0.10^{2} \times 4{,}0.10^{-4} = 0{,}16$ S.m$^{-1}$.

**2.**

**▸ Préparation de la gamme d'étalonnage**

Dans chaque cas, il faut calculer le facteur de dilution $F = \dfrac{c_{mère}}{c_{fille}}$.

Pour la solution $S_1$, $F = \dfrac{4{,}00.10^{-2}}{1{,}00.10^{-2}} = 4{,}00$.

Pour la solution $S_2$, $F = \dfrac{4{,}00.10^{-2}}{8{,}00.10^{-3}} = 5{,}00$.

Pour la solution $S_3$, $F = \dfrac{4{,}00.10^{-2}}{4{,}00.10^{-3}} = 10{,}0$.

Pour la solution $S_4$, $F = \dfrac{4{,}00.10^{-2}}{2{,}00.10^{-3}} = 20{,}0$.

Sachant que le volume de solution fille à préparer est à chaque fois :

$$V_f = 100{,}0 \text{ mL}$$

(fioles jaugées de 100,0 mL disponibles),
le volume $V_0$ de solution $S_0$ à prélever vaut :

$$V_0 = \frac{V_f}{F}.$$

Pour la solution $S_1$, le volume à prélever est :

$$V_0 = \frac{100{,}0}{4{,}00} = 25{,}0 \text{ mL}.$$

Pour la solution $S_2$, $V_0 = \dfrac{100{,}0}{5{,}00} = 20{,}0$ mL.

Pour la solution $S_3$, $V_0 = \dfrac{100{,}0}{10{,}0} = 10{,}0$ mL.

Pour la solution $S_4$, $V_0 = \dfrac{100{,}0}{20{,}0} = 5{,}00$ mL.

**▸ Mode opératoire pour la solution $S_4$ par exemple**

Prélever 5,0 mL de solution $S_0$ à l'aide d'une pipette jaugée et les introduire dans une fiole jaugée de 100,0 mL.

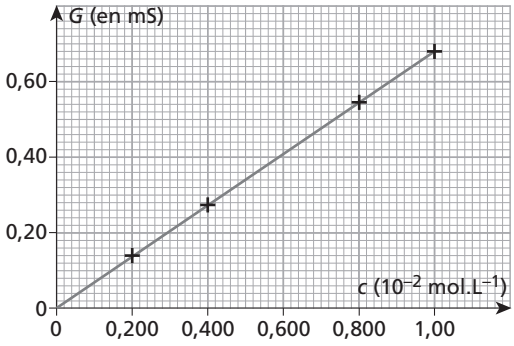
Ajouter de l'eau, homogénéiser et compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

Homogénéiser.

**▸ Exemples de mesures**

| $c$ (en mol.L$^{-1}$) | $G$ (en mS) |
|---|---|
| $1{,}00.10^{-2}$ | 0,68 |
| $8{,}00.10^{-3}$ | 0,54 |
| $4{,}00.10^{-3}$ | 0,27 |
| $2{,}00.10^{-3}$ | 0,14 |

**c.**




**d.** En traçant la droite de régression, on obtient son équation :

$$G = 68\ c$$

où $G$ est en mS et $c$ en mol.L$^{-1}$.

En utilisant l'équation de la courbe, il est possible de déterminer $c_x$ :

$$c_x = \frac{G_S}{68}.$$

Par exemple, pour $G_S = 4{,}0.10^{-4}$ S = 0,40 mS :

$$c_x = \frac{0{,}40}{68} = 5{,}9.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

### *Commentaires*

• En l'absence de conductimètre affichant $G$, il est possible de réaliser la même activité en effectuant un montage composé d'un GBF (imposant une tension $U_{AB}$ = 0,5 V, pour ne pas avoir d'électrolyse, à une fréquence de 400 Hz – ce sont les valeurs usuelles des conductimètres), d'une cellule de conductimétrie (deux électrodes), d'un ampèremètre et d'un voltmètre aux bornes de la cellule.
La mesure de $I$ et de $U$ permet d'accéder à $G$ :

$$G = \frac{I}{U}.$$

• Le tracé à la main de la courbe d'étalonnage et une détermination graphique de $c_x$ sont également envisageables.

• La droite de régression obtenue (droite passant par l'origine) permet de mettre en évidence la loi de Kohlrausch (proportionnalité entre $G$ et $c$ pour un soluté ionique unique, en solutions suffisamment diluées).

Le professeur peut également effectuer l'analogie avec la loi de Beer-Lambert, déjà connue des élèves, qui correspond également à une relation de proportionnalité (entre l'absorbance et la concentration molaire cette fois).

## 2 Utiliser la conductivité pour doser un sérum (p. 451)

### *Objectif*

Le but de cette activité est de montrer comment il est possible d'utiliser la conductimétrie lors d'un dosage par étalonnage pour déterminer la concentration d'un soluté en vue d'un contrôle qualité dans le domaine de la santé.

Dans une première partie, l'élève est amené à réfléchir sur le choix de la gamme de solutions étalons nécessaires pour pouvoir doser le sérum, puis sur le protocole à mettre en œuvre pour préparer les différentes solutions filles de la gamme d'étalonnage. Dans l'exemple proposé, comme cela est souvent le cas dans les dosages par étalonnage, il sera nécessaire de diluer la solution inconnue afin que sa concentration soit dans la gamme des concentrations des solutions étalons.

La seconde partie, concernant l'exploitation des résultats, est plus guidée. Selon le choix du professeur, le tracé et l'exploitation de la courbe d'étalonnage peut se faire sur papier millimétré ou à l'aide d'un tableur-grapheur. Une réflexion sur la précision des mesures est menée en fin d'activité. L'incertitude de la mesure est évaluée à l'aide d'une formule fournie, comme le recommande le programme, ce qui permet d'exprimer le résultat du dosage avec son intervalle de confiance et de le comparer aux indications de la notice du médicament.

### *Correspondance avec le programme*

• Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce à l'aide de courbes d'étalonnage en utilisant la conductimétrie, dans le domaine de la santé ou du contrôle de la qualité.

• Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.

### *Liste de matériel*

• Un conductimètre, son électrode et son support, plus sa notice et la solution pour l'étalonner.
• Un thermomètre.
• Quatre fioles jaugées de 100 mL.
• Une fiole jaugée de 50 mL.
• Une propipette.
• Des pipettes jaugées de 5 mL, 10 mL? 20 mL, 25 mL, 50 mL.
• Une pissette d'eau distillée.
• Des béchers.

### *Liste des produits*

• Un sérum physiologique : solution de chlorure de sodium à 0,9 % en masse (soit 0,15 mol.L$^{-1}$), acheté en pharmacie.

• Une solution mère $S_0$ de chlorure de sodium de concentration $c_0 = 5{,}00.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$ (environ 150 mL par binôme).

### *Corrigé*

**1.a.** Les concentrations des solutions de la gamme d'étalonnage doivent encadrer la concentration de la solution à doser.

Ici, d'après la notice, le sérum commercial est à 0,9 % en masse, soit une concentration massique en chlorure de sodium voisine de 9 g.L$^{-1}$.

Une gamme d'étalonnage avec des concentrations comprises entre 1 g.L$^{-1}$ et 20 g.L$^{-1}$ pourrait par exemple convenir.

**b.** Calcul de la concentration massique $c_{m0}$ en chlorure de sodium dans $S_0$ :

$c_{m0} = c_0\, M(\text{NaCl})$

$c_{m0} = 5{,}00.10^{-2} \times (23{,}0 + 35{,}5) = 2{,}93$ g.L$^{-1}$.

Cette solution étant moins concentrée que la solution à doser, il est donc nécessaire de diluer au préalable la solution à doser.

**c.** Dans chaque cas, il faut calculer le facteur de dilution $F = \dfrac{c_{\text{mère}}}{c_{\text{fille}}}$.

Pour la solution $S_1$, $F = \dfrac{5{,}00.10^{-2}}{2{,}50.10^{-2}} = 2{,}00$.

Pour la solution $S_2$, $F = \dfrac{5{,}00.10^{-2}}{1{,}25.10^{-2}} = 4{,}00$.

Pour la solution $S_3$, $F = \dfrac{5{,}00.10^{-2}}{1{,}00.10^{-2}} = 5{,}00$.

Pour la solution $S_4$, $F = \dfrac{5{,}00.10^{-2}}{0{,}50.10^{-2}} = 10{,}0$.

Sachant que le volume de solution fille à préparer est à chaque fois $V_f = 100{,}0$ mL (fioles jaugées de 100,0 mL disponibles), le volume $V_0$ de solution $S_0$ à prélever s'obtient par $V_0 = \dfrac{V_f}{F}$.

Ainsi, pour la solution $S_1$, le volume à prélever est :

$V_0 = \dfrac{100{,}0}{2{,}00} = 50{,}0\,\text{mL}$.

Pour la solution $S_2$, $V_0 = \dfrac{100{,}0}{4{,}00} = 25{,}0\,\text{mL}$.

Pour la solution $S_3$, $V_0 = \dfrac{100{,}0}{5{,}00} = 20{,}0\,\text{mL}$.

Pour la solution $S_4$, $V_0 = \dfrac{100{,}0}{10{,}0} = 10{,}0\,\text{mL}$.

**▸ Mode opératoire pour la solution $S_1$, par exemple**

Prélever 50,0 mL de solution $S_0$ à l'aide d'une pipette jaugée. Les introduire dans une fiole jaugée de 100,0 mL, ajouter de l'eau, homogénéiser et compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser.

**d.** $c_{\text{sérum}} = \dfrac{c_m}{M(\text{NaCl})}$

$c_{\text{sérum}} = \dfrac{9{,}0}{23{,}0 + 35{,}5} = 0{,}15\,\text{mol.L}^{-1}$.

En diluant ce sérum commercial d'un facteur 10 par exemple, la concentration de la solution diluée sera « encadrée » par les solutions de la gamme d'étalonnage proposée.

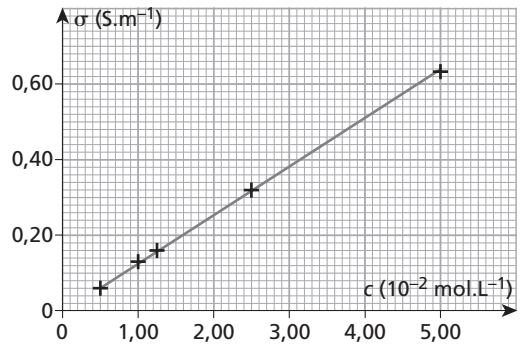
**▸ Mode opératoire pour la dilution du sérum commercial**

Prélever 5,00 mL de sérum physiologique commercial à l'aide d'une pipette jaugée. Les introduire dans une fiole jaugée de 50,0 mL, ajouter de l'eau, homogénéiser et compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser.

**▸ Conductivités des solutions filles**

| $c$ (en mol.L$^{-1}$) | $\sigma$ (en S.m$^{-1}$) |
|---|---|
| $5{,}00.10^{-2}$ | 0,63 |
| $2{,}50.10^{-2}$ | 0,32 |
| $1{,}25.10^{-2}$ | 0,16 |
| $1{,}00.10^{-2}$ | 0,13 |
| $5{,}00.10^{-3}$ | 0,06 |

**2.a.**




**b.** Pour le sérum dilué 10 fois :

$\sigma_x \approx 0{,}19$ S.m$^{-1}$ soit $c_x \approx 1{,}50.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$.

Pour le sérum commercial, $c = 10\, c_x$

$c = 10 \times 1{,}50.10^{-2} = 0{,}150$ mol.L$^{-1}$.

**c.** Le calcul de l'incertitude dépend de la verrerie et du conductimètre utilisé.
Par exemple, si $\Delta c_0 = 0{,}05.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$ :
$\frac{\Delta c}{c} = \frac{0{,}05.10^{-2}}{5{,}0.10^{-2}} + 2 \times 0{,}005 + 2 \times 0{,}005 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma}$.
L'incertitude relative se situe donc entre 3 % et 4 %.

**d.** $\Delta c = 4$ % $c$
$\Delta c = 0{,}04 \times 0{,}150 = 6.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$
0,144 mol.L$^{-1}$ < $c$ < 0,156 mol.L$^{-1}$
soit $c = 0{,}150 \pm 6.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

**e.** Le pourcentage massique vaut $\frac{100\, m_{NaCl}}{m_{sérum}}$.
La masse de chlorure de sodium est $m_{NaCl} = c V M(NaCl)$ et celle du sérum est $m_{sérum} = \rho V$.
Donc le pourcentage massique vaut : $\frac{100\, c\, M(NaCl)}{\rho}$
Pourcentage massique $= \frac{100 \times 0{,}150 \times (23{,}0 + 35{,}5)}{1{,}005.10^3}$
= 0,87 %.

***Commentaires***

• La formule donnée dans l'activité pour calculer l'incertitude est une formule simplifiée. Les facteurs 2 introduits pour l'incertitude due à la verrerie viennent du fait que deux dilutions ont été mises en œuvre (celle du sérum commercial et celle pour la préparation de la solution étalon).

• Dans l'activité proposée, nous suggérons l'utilisation d'un conductimètre et la mesure de la conductivité $\sigma$. Il est cependant possible d'effectuer la même activité en mesurant la conductance $G$ des solutions étalons et celle du sérum.

## 3 Utiliser la spectrophotométrie pour analyser des solutions (p. 452)

***Objectif***

Le but de cette activité est de montrer comment il est possible d'utiliser la spectrophotométrie lors d'un dosage par étalonnage pour déterminer la concentration d'une espèce chimique dans le cas d'un contrôle qualité dans le domaine de l'environnement. La question posée dans l'activité est de savoir si une solution « déchet » contenant des ions cuivre (II) peut ou non être rejetée dans l'environnement. Pour y répondre, l'élève est amené à déterminer la concentration des ions cuivre (II) dans cette solution grâce à un dosage par étalonnage et à comparer la valeur trouvée à la norme autorisée (voir la fiche toxicologique de la **figure 3** p. 452 du manuel de l'élève).

Les concentrations étant données, l'élève doit préparer la gamme d'étalonnage. Il doit choisir lui-même la verrerie à utiliser et mettre en œuvre le protocole de dilution, puis réaliser des mesures d'absorbance pour les solutions de la gamme et pour la solution analysée. Ensuite, il doit tracer la courbe d'étalonnage avant de la modéliser à l'aide d'un tableur-grapheur. Une réflexion est menée sur le lien entre absorption et couleur de la solution. En effet, les solutions analysées étant peu colorées (**figure 4** p. 452) et absorbant peu dans le domaine visible, un réactif spécifique (l'ammoniac) est ajouté en excès dans toutes les solutions afin de former un complexe des ions cuivre absorbant dans le visible et pouvant être dosés par spectrophotométrie.

Pour finir, l'élève est amené, comme le recommande le programme officiel, à réfléchir sur les sources d'erreurs possibles dans la démarche expérimentale mise en œuvre.

***Correspondance avec le programme***

• Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce à l'aide de courbes d'étalonnage en utilisant la spectrophotométrie, dans le domaine de l'environnement.

• Identifier les différentes sources d'erreur (de limites à la précision) lors d'une mesure : variabilités du phénomène et de l'acte de mesure (facteurs liés à l'opérateur, aux instruments, etc.).

***Liste de matériel***

• Un spectrophotomètre, sa notice et six cuves de spectrophotomètre.
• Une hotte.
• Six fioles jaugées de 50 mL.
• Une propipette.
• Des pipettes jaugées de 5 mL, 10 mL, 20 mL et 25 mL.
• Des béchers.

***Liste des produits***

• Une solution de chlorure de cuivre (II) de concentration $c_x = 5{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$ (environ 50 mL par binôme).
• Une solution mère $S_0$ de chlorure de cuivre (II) de concentration $c_0 = 2{,}00.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$ (environ 80 mL par binôme ; voir fiche toxicologique **figure 3** p. 452).
• De l'ammoniac à 10 % (environ 50 mL par élève) sous la hotte.

• Une pissette d'eau distillée.

*Corrigé*

**1.**

**► Calcul du facteur de dilution et du volume de solution à prélever**

Dans chaque cas, il faut calculer le facteur de dilution $F = \frac{c_{mère}}{c_{fille}}$.

Pour la solution $S_1$, $F = \frac{2{,}00.10^{-2}}{2{,}0.10^{-3}} = 10$.

Pour la solution $S_2$, $F = \frac{2{,}00.10^{-2}}{4{,}0.10^{-3}} = 5{,}0$.

Pour la solution $S_3$ : $F = \frac{2{,}00.10^{-2}}{6{,}0.10^{-3}} = 3{,}3$.

Pour la solution $S_4$ : $F = \frac{2{,}00.10^{-2}}{8{,}0.10^{-3}} = 2{,}5$.

Sachant que le volume de solution fille à préparer est à chaque fois $V_f = 50{,}0$ mL (fioles jaugées de 50,0 mL disponibles), le volume de solution $S_0$ à prélever vaut $V_0 = \frac{V_f}{F}$.

Ainsi, pour la solution $S_1$, le volume à prélever est $V_0 = \frac{50{,}0}{10} = 5{,}0\,\text{mL}$.

Pour la solution $S_2$, $V_0 = \frac{50{,}0}{5{,}0} = 10{,}0\,\text{mL}$.

Pour la solution $S_3$, $V_0 = \frac{50{,}0}{3{,}3} = 15{,}0\,\text{mL}$.

Pour la solution $S_4$, $V_0 = \frac{50{,}0}{2{,}5} = 20{,}0\,\text{mL}$.

**► Mode opératoire pour la solution $S_1$, par exemple**

Prélever 5,0 mL de solution $S_0$ à l'aide d'une pipette jaugée. Les introduire dans une fiole jaugée de 50,0 mL, ajouter de l'eau, homogénéiser et compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser.

**a.** L'ion cuivre (II) et l'ion tétraammine cuivre (II) ayant le même nombre stœchiométrique dans l'équation de la réaction, la quantité de matière d'ions tétraammine cuivre (II) formée est la même que celle des ions cuivre (II) initalement présents dans la solution, à condition que les ions cuivre (II) soient le réactif limitant. Pour cela, il est nécessaire d'ajouter l'ammoniac en excès, soit $n(NH_3) > 4\ n(Cu^{2+})$ où $n(NH_3)$ est la quantité de matière d'ammoniac ajoutée en solution et $n(Cu^{2+})$ la quantité de matière initiale d'ions cuivre (II) dans la solution.

**b.** Toutes les mesures doivent être effectuées à la même longueur d'onde avec des cuves identiques. Il faut rincer chaque cuve avec la solution qu'elle va contenir, éviter de mettre les doigts sur les faces de la cuve qui vont être traversées par la lumière, vérifier qu'il n'y ait pas de bulles d'air à l'intérieur de la cuve. Il faut prendre garde au sens d'introduction de la cuve dans le spectrophotomètre (voir sens de traversée de la lumière). Effectuer le blanc avant la première mesure puis effectuer les différentes mesures successivement par ordre croissant de concentration.

**c.** À 625 nm, l'absorption de l'ion tétraammine cuivre (II) est maximale (voir spectre d'absorption **figure 5** p. 453) : la sensibilité de l'appareil sera donc meilleure à cette longueur d'onde et la précision des mesures sera maximale.

**d.** En l'absence d'ammoniac, les solutions absorbent la partie rouge du rayonnement visible, c'est pourquoi elles nous paraissent bleues, avec une nuance turquoise (nuance du haut du triangle des couleurs en rabat de couverture). En présence d'ammoniac, l'absorption est maximale à 625 nm (dans le rouge), ce qui correspond d'après le triangle des couleurs complémentaires à une solution de couleur cyan – bleu nuit. Le fait que le coefficient d'absorption molaire de la forme hydratée soit moindre que celui de la forme aminée rend compte du fait que, pour la même concentration, la teinte bleue de la solution soit à peine perceptible dans un cas et soutenue dans l'autre.

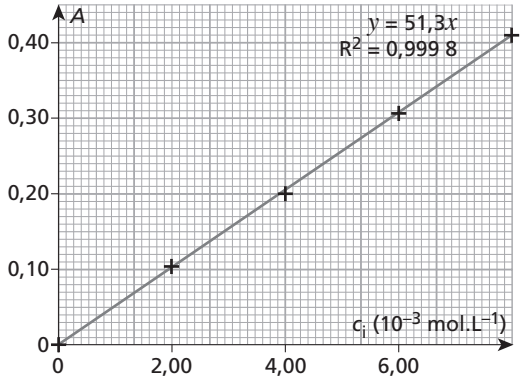
**e.** En l'absence d'ammoniac, il aurait fallu se placer au maximum d'absorption des ions cuivre, soit au-delà de 800 nm (c'est-à-dire dans le proche infrarouge), d'après le spectre d'absorption (**figure 5** p. 453). En pratique, le spectrophotomètre aurait été réglé à 800 nm, qui est la longueur d'onde maximale proposée par le constructeur.

**f.** La solution $S_0$ contient le solvant (eau et ammoniac ici) des solutions étalons et de la solution inconnue. En effectuant ce blanc, on élimine l'absorbance due à la cuve et au solvant pour l'ensemble des mesures. Ici, la solution $S_B$ préconisée pour effectuer le blanc contient effectivement de l'eau et de l'ammoniac en même quantité que dans toutes les autres solutions.

**g.** $A = \varepsilon \ell c$ avec :

- $A$ l'absorbance de la solution sans unité (c'est le logarithme d'un rapport, voir chapitre 4),
- $\varepsilon$ le coefficient d'absorption molaire de l'espèce colorée en $L.mol^{-1}.cm^{-1}$,
- $\ell$ la longueur de la cuve traversée par la lumière en cm,
- $c$ la concentration molaire de l'espèce colorée qui absorbe en $mol.L^{-1}$.

**h.**




**i.** La loi de Beer Lambert est bien vérifiée car la courbe d'étalonnage peut être modélisée par une droite de régression qui est une droite passant par l'origine (voir le graphique précédent), ce qui est en accord avec une relation de proportionnalité entre $A$ et $c$.

**j.** Voir la modélisation sur le graphe.

**k.** Pour la solution S, $A_S = 0{,}127$.
On détermine la concentration molaire $c_S$ en ions cuivre (II) dans S en utilisant l'équation de la droite de régression : $A = 51{,}3\ c$ donc $c_S = \dfrac{A_S}{51{,}3}$
$c_S = \dfrac{0{,}127}{51{,}3} = 2{,}48.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

La solution « déchet » ayant été diluée deux fois pour préparer la solution S, sa concentration $c$ vaut $c = 2{,}00\ c_S$
$c = 2{,}00 \times 2{,}49.10^{-3} = 4{,}96.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.
Cela correspond à une concentration massique $c_m$ en ions cuivre (II) $c_m = c\ M(\text{Cu})$
$c_m = 4{,}96.10^{-3} \times 63{,}5 = 0{,}315$ g.L$^{-1}$ soit :
315 mg.L$^{-1}$.
Cette solution ne peut donc pas être rejetée dans l'environnement sans danger.

**l.** Sources d'erreurs possibles :
• utilisation de la verrerie lors de la dilution de la solution « déchet » et lors des dilutions pour préparer les solutions de la gamme,
• incertitude sur la concentration de la solution mère utilisée pour préparer la gamme d'étalonnage,
• niveau de précision des mesures d'absorbance réalisées avec le spectrophotomètre ;
• modélisation par la droite de régression.
$\Delta c = 0{,}03\ c$
$\Delta c = 0{,}03 \times 5{,}0.10^{-3} = 2.10^{-4}$ mol.L$^{-1}$
soit $c = 5{,}0.10^{-3} \pm 2.10^{-4}$ mol.L$^{-1}$.

***Commentaires***

• En toute rigueur, le blanc permet également de corriger les réflexions partielles dues aux franchissements des différents dioptres lors de la traversée de la cuve. Pour les élèves, il est plus simple de mettre tous ces phénomènes sur le compte de l'absorption.

• En réalité, des ions complexes autres que l'ion tétraammine cuivre (II) sont sans doute formés lors de l'addition d'ammoniac. En effet, le pH et la présence d'autres ligands tels que l'eau ou les ions chlorure jouent un rôle important sur le type d'ion complexe formé.

• Il serait possible de préparer une solution « déchet » moins concentrée, cependant il deviendrait alors difficile de mesurer précisément les absorbances des solutions avec les spectrophotomètres dont nous disposons dans les lycées.

# Exercices

## Applications

### 1 Principe du dosage

**a.** C'est l'absorbance des solutions.

**b.** Il s'agit d'une dilution.

**c.** Une fiole jaugée est nécessaire pour préparer un volume précis de solution étalon (solution fille). Le prélèvement d'un volume précis de solution mère s'effectue à la pipette jaugée. Un bécher annexe est aussi utilisé pour effectuer le prélèvement.

### 2 Absorbances de solutions

**a.** D'après la loi de Beer-Lambert : $A = kc$ donc $k = \dfrac{A}{c}$.
Ici, $k = \dfrac{A_0}{c_0}$ soit $k = \dfrac{0{,}848}{1{,}28.10^{-3}} = 6{,}63.10^2$.

**b.** Pour avoir une meilleure précision, il faudrait effectuer les mesures d'absorbance pour plusieurs solutions étalons, tracer la courbe d'étalonnage $A = f(c)$ puis calculer le coefficient directeur de la droite passant par l'origine obtenue : ce coefficient directeur correspondrait à $k$.

*Remarque* : l'intervalle de confiance résultant de la régression linéaire sur un petit nombre de données serait le même que pour une mesure unique mais la valeur obtenue serait plus proche de la valeur de référence.

**c.** $A_1 = kc_1$
$A_1 = 6{,}63.10^2 \times 6{,}39.10^{-4} = 0{,}424$.

**d.** Toutes les mesures doivent être effectuées dans les mêmes conditions expérimentales, c'est-à-dire avec le même solvant, la même cuve et à la même longueur d'onde.

**e.** $A_x = kc_x$ donc $c_x = \dfrac{A_x}{k}$

$c_x = \dfrac{0{,}632}{6{,}63.10^2} = 9{,}53.10^{-4}$ mol.L$^{-1}$.

### 3 Dosage spectrophotométrique

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 4 Courbe d'étalonnage

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 5 Dosage conductimétrique

**A** Faux : les mesures ont pu être faites avec un conductimètre mais qui a mesuré *G*, c'est-à-dire la conductance, et non la conductivité.

**B** Vrai : $c_x = \dfrac{G_x}{0{,}83}$

$c_x = \dfrac{2{,}5.10^{-3}}{0{,}83} = 3{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

**C** Faux : voir la réponse précédente.

**D** Faux : effectuer le zéro est obligatoire lors d'un dosage par spectrophotométrie uniquement afin de ne pas tenir compte de l'absorption due à la cuve et au solvant. Ceci est inutile lors d'un dosage utilisant la conductimétrie puisque le solvant seul ne conduit quasiment pas l'électricité.

### 6 Conductivités de solutions ioniques

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 7 Conductivité d'une solution d'acide nitrique

**a.** $\sigma = \lambda_{H_3O^+}\left[H_3O^+\right] + \lambda_{NO_3^-}\left[NO_3^-\right] = \left(\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{NO_3^-}\right)c$

où $c$ est la concentration molaire de la solution d'acide nitrique.

$$c = \frac{\sigma}{\lambda_{H_3O^+} + \lambda_{NO_3^-}}$$

$$c = \frac{0{,}210}{35{,}0.10^{-3} + 7{,}1.10^{-3}} = 4{,}99 \text{ mol.m}^{-3}$$

soit $4{,}99.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

**b.** Si la concentration double, la conductivité va également doubler. En effet, pour une solution contenant un seul électrolyte, $\sigma = kc$.

Si $c' = 2c$ alors $\sigma' = 2kc = 2\sigma$.

*Remarque* : cette proportionnalité entre $\sigma$ et c est respectée tant que la solution reste raisonnablement diluée.

### 8 Dosage conductimétrique par étalonnage

**a.** Il est possible de mesurer la conductance *G* ou la conductivité $\sigma$.

**b.** Le glucose est un solide moléculaire, sa solution aqueuse ne contient pas d'ions, elle ne peut donc pas être dosée par conductimétrie.

**c.** Soit $c_1$ la concentration molaire de la solution fille obtenue par dilution de la solution mère avec un facteur 2,00 : $c_1 = \dfrac{c_0}{2{,}00}$

$c_1 = \dfrac{0{,}016}{2{,}00} = 8{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

Soit $c_2$ la concentration molaire de la solution fille obtenue par dilution de la solution précédente avec un facteur 2,00 : $c_2 = \dfrac{c_1}{2{,}00}$

$c_2 = \dfrac{8{,}0.10^{-3}}{2{,}00} = 4{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

Soit $c_3$ la concentration molaire de la solution fille obtenue par dilution de la solution précédente avec un facteur 2,00 : $c_3 = \dfrac{c_2}{2{,}00}$

$c_3 = \dfrac{4{,}0.10^{-3}}{2{,}00} = 2{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

**d.** Afin de diluer avec un facteur 2,00, il faut à chaque fois prélever un volume de solution mère égal à 50,0 mL à l'aide d'une pipette jaugée, l'introduire dans une fiole jaugée de 100 mL, ajouter de l'eau distillée, homogénéiser puis compléter jusqu'au trait de jauge. Il suffit alors d'homogénéiser.

## Entraînement

### 9 Cures de calcium

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 10 Conductivités de solutions

**a.** Soit la masse $m_0 = 1{,}195$ g de nitrate de potassium de masse molaire *M* dissoute dans $V = 1{,}00$ L.

$c_0 = \dfrac{n_0}{V} = \dfrac{m_0}{MV}$

$c_0 = \dfrac{1{,}195}{101{,}1 \times 1{,}00} = 1{,}18.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$.

**b.** Les solutions étalons sont obtenues par dilution de la solution $S_0$. Le facteur de dilution est $F = \dfrac{c_{\text{mère}}}{c_{\text{fille}}}$.

Il faut donc diluer 10 fois $S_0$ pour obtenir $S_1$, diluer 20 fois $S_0$ pour obtenir $S_2$, diluer 100 fois $S_0$ pour obtenir $S_3$ et diluer 250 fois $S_0$ pour obtenir $S_4$.

Le protocole est le suivant : prélever un volume de solution $S_0$ égal à 50,0 mL (ou 25,0 mL ou 5,0 mL ou 2,0 mL) à l'aide d'une pipette jaugée et l'introduire dans une fiole jaugée de 500,0 mL.

Ajouter de l'eau distillée, homogénéiser puis compléter jusqu'au trait de jauge.

Il suffit alors d'homogénéiser pour obtenir la solution $S_1$ (ou $S_2$ ou $S_3$ ou $S_4$).

**c.** Les valeurs de conductivité ont été mesurées à l'aide d'un conductimètre.

Toutes les mesures ont dû être effectuées dans les mêmes conditions expérimentales : même température, même solvant, même cellule de conductimétrie.

Pour effectuer les mesures, il faut commencer par la solution la plus diluée puis aller vers les plus concentrées.

Il faut également bien rincer la cellule entre les mesures avec de petites portions de la solution suivante à chaque fois.

**d.** L'utilisation de l'équation de la courbe d'étalonnage permet de déterminer $c_x$ : $c_x = \dfrac{\sigma_x}{0{,}014}$ où $\sigma_x$ est la conductivité de la solution $S_x$ en $S.m^{-1}$ et $c_x$ la concentration molaire de la solution $S_x$ en $mol.m^{-3}$

$c_x = \dfrac{6{,}6.10^{-3}}{0{,}014} = 0{,}47\,mol.m^{-3} = 4{,}7.10^{-4}\,mol.L^{-1}$.

**e.** C'est uniquement dans le cas d'un seul type d'électrolyte que la conductivité est proportionnelle à la concentration de l'électrolyte et que la courbe d'étalonnage précédente pourrait être utilisée. Ici, la solution $S_y$ ne contient pas uniquement du nitrate de potassium mais également du chlorure de sodium, il est donc impossible de reporter la valeur de la conductivité de $\sigma_y$ dans l'équation précédente.

**f.** $\sigma_y = \sigma + \sigma'$ avec $\sigma'$ la conductivité due au chlorure de sodium dans la solution et $\sigma$ la conductivité due au nitrate de potassium dans la solution.

On peut alors calculer $\sigma'$ :

$\sigma' = \left(\lambda_{Na^+} + \lambda_{Cl^-}\right)c$ où $c$ est exprimée en $mol.m^{-3}$

$\sigma' = (5{,}0.10^{-3} + 7{,}6.10^{-3}) \times 5{,}00.10^{-1} = 6{,}3.10^{-3}$ S.m$^1$ soit 6,3 $mS.m^{-1}$.

On en déduit la conductivité $\sigma$ :

$\sigma = \sigma_y - \sigma'$

$\sigma = 17{,}1 - 6{,}3 = 10{,}8\ mS.m^{-1}$ soit $1{,}08.10^{-2}\ S.m^{-1}$.

On peut alors utiliser l'équation de la courbe d'étalonnage obtenue avec les solutions de nitrate de potassium :

$c_y = \dfrac{\sigma_y}{0{,}014}$ où $\sigma$ est en $S.m^{-1}$ et $c_y$, la concentration molaire en nitrate de potassium de la solution $S_y$, en $mol.m^{-3}$

$c_y = \dfrac{1{,}08.10^{-2}}{0{,}014} = 0{,}77\,mol.m^{-3} = 7{,}7.10^{-4}\,mol.L^{-1}$.

### 11 Pollution phosphorée

**a.** La droite passe par l'origine, son équation est du type $A = kc$.

Soit le point de coordonnées (0,80 ; 0,48) appartenant à la droite : $k = \dfrac{0{,}48}{0{,}80} = 0{,}60\ L.mg^{-1}$.

L'équation de la droite d'étalonnage est donc : $A = 0{,}60\,c$ où $c$ est exprimée en $mg.L^{-1}$.

Cette équation permet de déterminer la concentration massique en élément chimique phosphore dans chaque eau analysée : $c = \dfrac{A_{eau}}{0{,}60}$. Donc :

$c_{eau1} = \dfrac{0{,}460}{0{,}60} = 0{,}77\ mg.L^{-1}$ soit $7{,}7.10^2\ \mu g.L^{-1}$.

$c_{eau2} = \dfrac{0{,}175}{0{,}60} = 0{,}29\ mg.L^{-1}$ soit $2{,}9.10^2\ \mu g.L^{-1}$.

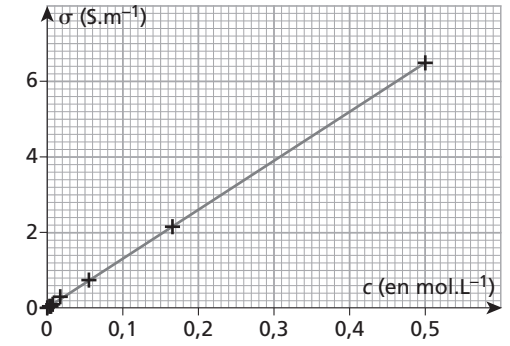
**b.** $c_{eau\,1} > 500\ \mu g.L^{-1}$ : l'eau 1 est donc polluée.

$c_{eau\,2} < 500\ \mu g.L^{-1}$ : l'eau 2 n'est donc pas polluée.

## Approfondissement

### 12 Conductivité de solutions concentrées

**1.a.**




**b.** La loi de Kohlrausch semble respectée car on obtient une droite passant par l'origine correspondant à une relation de proportionnalité entre $\sigma$ et $c$.

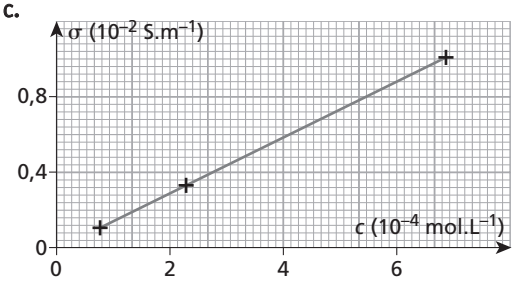
Le coefficient de proportionnalité est :

$k = 12{,}9\ S.L.m^{-1}.mol^{-1}$

(ordonnée à l'origine = 0,003 959 $S.m^{-1}$

et $r^2 = 0{,}999\,934$).

**c.**



Le coefficient proportionnalité est :
$k' = 14{,}7$ S.L.m$^{-1}$.mol$^{-1}$
(ordonnée à l'origine = $2{,}8.10^{-5}$ S.m$^{-1}$
et $r^2 = 0{,}999\ 997$).

**d.** Les trois premiers points qui constituent une droite de pente 14,7 (solutions diluées) sont pratiquement confondus avec l'origine dans le graphe contenant l'intégralité des données. Ceci laisse penser à tort que tous les points y sont alignés avec une pente de 12,9.

**e.** La loi de Kohlrausch est valable pour des solutions diluées. Quand les solutions deviennent plus concentrées, la conductance des solutions n'augmente pas proportionnellement mais elle s'infléchit progressivement (d'où la diminution du coefficient $k$).

**2.a.** Pour la solution la plus concentrée :

$$\sigma = 15{,}0 \times 0{,}500 - 9{,}53 \times 0{,}500 \times \sqrt{0{,}500} + 9{,}25 \times 0{,}500^2$$

$\sigma = 6{,}44$ S.m$^{-1}$.

Pour la solution la plus diluée :

$$\sigma = 15{,}0 \times 7{,}62.10^{-5} - 9{,}53 \times 7{,}62.10^{-5} \times \sqrt{7{,}62.10^{-5}} + 9{,}25 \times \left(7{,}62.10^{-5}\right)^2$$

$\sigma = 1{,}14.10^{-3}$ S.m$^{-1}$.

**b.** La comparaison numérique des termes de l'expression de $\sigma$ est rassemblée dans le tableau suivant (les concentrations sont exprimées en mol.L$^{-1}$) :

| | $\alpha c$ | $ßc\sqrt{c}$ | $\gamma c^2$ |
|---|---|---|---|
| $c = 0{,}500$ | 7,5 | 3,4 | 2,3 |
| $c = 7{,}62.10^{-5}$ | $1{,}1.10^{-3}$ | $6{,}3.10^{-6}$ | $5{,}4.10^{-8}$ |

Ce tableau montre que les termes $ßc\sqrt{c}$ et $\gamma c^2$ ne sont pas négligeables pour la grande concentration alors qu'ils le sont pour la petite.

**c.** En milieu dilué, la loi peut donc se simplifier en négligeant les termes $ßc\sqrt{c}$ et $\gamma c^2$.
De la grande relation, il reste donc $\sigma = \alpha c$.
Cela exprime bien la proportionnalité entre $\sigma$ et $c$, la concentration molaire de l'électrolyte, en accord avec la loi de Kohlrausch.

**d.** En traçant la droite de coefficient directeur $k' = 14{,}7$ S.L.m$^{-1}$.mol$^{-1}$ sur le premier graphique, on s'aperçoit que l'écart entre les deux droites est supérieur à 5 % à partir de $c > 1{,}4.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$. Cela se traduit par une définition de ce qu'on appelle « solution diluée » si une erreur de 5 % est acceptée.

Il est également possible de le constater numériquement, même si la réponse est moins précise vu les données du tableau :

| $c$ (mol.L$^{-1}$) | $\sigma$ (S.m$^{-1}$) | $14{,}7c$ (mol.L$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 0,5 | 6,44 | 7,35 |
| 0,167 | 2,11 | 2,4549 |
| 0,0556 | 0,738 | 0,81732 |
| 0,0185 | 0,257 | 0,27195 |
| $6{,}17.10^{-3}$ | $8{,}83.10^{-2}$ | 0,090699 |
| $2{,}06.10^{-3}$ | $3{,}00.10^{-2}$ | 0,030282 |
| $6{,}86.10^{-4}$ | $1{,}01.10^{-2}$ | 0,0100842 |
| $2{,}29.10^{-4}$ | $3{,}40.10^{-3}$ | 0,0033663 |
| $7{,}62.10^{-5}$ | $1{,}14.10^{-3}$ | 0,00112014 |

Si $c > 6{,}17.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$ alors $\frac{\Delta\sigma}{\sigma} > 5$ %.

## Exercices de BAC

### 13 Détection du tabagisme

**a.** La solution 0 contient le solvant des solutions étalons et de la solution inconnue. En effectuant ce blanc, on élimine l'absorbance due à la cuve et au solvant pour l'ensemble des mesures.

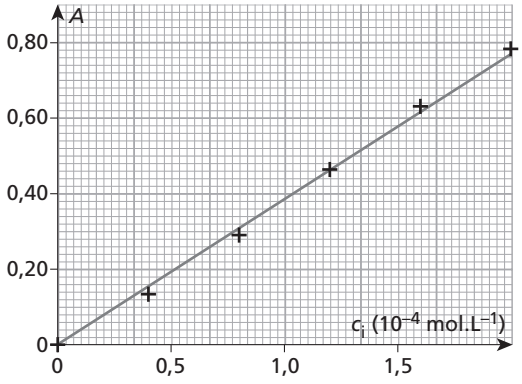
*Remarque* : en toute rigueur, le blanc permet également de corriger les réflexions partielles dues aux franchissements des différents dioptres lors de la traversée de la cuve. Pour les élèves, il est plus simple de mettre tous ces phénomènes sur le compte de l'absorption.

**b.** La longueur d'onde de travail est à 490 nm, les solutions absorbent donc au maximum à cette longueur d'onde (soit dans le bleu). Les solutions nous apparaissent de la couleur complémentaire du bleu, c'est-à-dire rouge, d'après le triangle des couleurs.

**c.** Sachant que ce sont les ions $SCN^-$ qui sont dosés, il faut que tous ces ions se tranforment en ions complexes réellement dosés par spectrophotométrie. Pour cela, les ions $SCN^-$ doivent être le réactif limitant et donc les ions fer (III) doivent être introduits en excès.

*Remarque* : en toute rigueur, il s'agit plus d'un déplacement de l'équilibre de complexation que d'une relation entre réactif limitant et réactif en excès. Cependant, pour les élèves, l'argument du réactif en excès est bien adapté.

**d.** Le tracé de la courbe d'étalonnage conduit à la courbe de tendance d'équation $A = 3{,}9.10^3\ c$, où $c$ est en mol.L$^{-1}$, avec $r^2 = 0{,}9969$.




La valeur du coefficient de corrélation, supérieure à 0,99, indique que les points obtenus sont assez proches de la droite de régression pour que celle-ci puisse être considérée comme un modèle satisfaisant.

**e.** La loi de Beer-Lambert est bien vérifiée puisque la droite de régression obtenue est une droite passant par l'origine, ce qui est en accord avec la loi $A = kc$.

**f.** En utilisant l'équation de la courbe de tendance $A = 3{,}9.10^3\ c$ pour la solution analysée de concentration molaire $c_x$ en ions thiocyanate avec $A_x = 0{,}655$.

D'où $c_x = \dfrac{A_x}{3{,}9.10^3}$

$c_x = \dfrac{0{,}665}{3{,}9.10^3} = 1{,}7.10^{-4}$ mol.L$^{-1}$.

Soit $c$ la concentration molaire en ions thyocyanate dans la salive :

$c = Fc_x$ car la salive a été diluée.

Sachant que $\rho_{salive} = 1{,}0$ g.mL$^{-1}$, 250 mg de salive correspondent à 250 µL de salive, d'où :

$$F = \frac{10.10^{-3}}{250.10^{-6}} = 40.$$

$c = 40 \times 1{,}7.10^{-4} = 6{,}8.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$ soit 6,8 mmol.L$^{-1}$.

**g.** $c > 2$ mmol.L$^{-1}$ : l'individu est donc un fumeur.

**h.** En mesurant un volume de salive, il risque d'y avoir une formation de bulles donc une mesure peu précise. De plus, il n'y a pas de verrerie de précision pour mesurer de si petits volumes alors que des balances permettant des mesures à 0,1 mg près existent.

## 14 Sirop de menthe

**a.** Il faut se placer au maximum d'absorption du colorant bleu soit à 640 nm, d'après le deuxième spectre d'absorption.

**b.** D'après l'équation de la courbe d'étalonnage, $A = 0{,}16\ c$. D'où l'expression de $c_1$, la concentration massique en colorant bleu dans le sirop dilué :

$c_1 = \dfrac{A_1}{0{,}16}$

$c_1 = \dfrac{1{,}06}{0{,}16} = 6{,}6$ mg.L$^{-1}$.

Le sirop ayant été dilué 10 fois, la concentration molaire $c_B$ en colorant bleu dans le sirop est $c_B = 10\ c_1$

$c_B = 10 \times 6{,}6 = 66$ mg.L$^{-1}$.

**c.** Bien que le colorant jaune absorbe de façon maximale à 420 nm, le colorant bleu absorbe également un peu à cette longueur d'onde, sa présence contribuerait à l'absorbance de la solution. Par contre, à 450 nm, l'absorption du colorant jaune reste encore élevée alors que le colorant bleu n'absorbe plus du tout, cette longueur d'onde est donc plus appropriée pour effectuer les mesures.

## 15 Dosage du Dakin

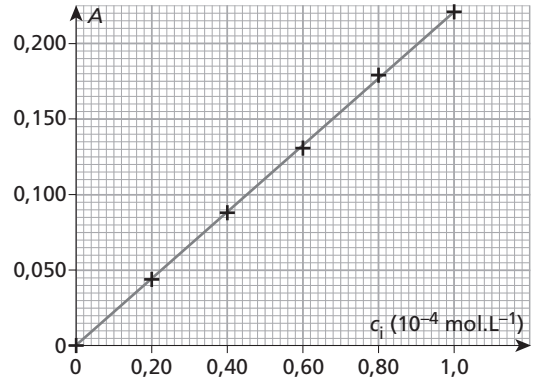
**a.** Soit $m_0$ la masse de permanganate de potassium solide à peser pour préparer cette solution :

$m_0 = c_0\ V_0\ M(KMnO_4)$

$m_0 = 1{,}0.10^{-2} \times 500.10^{-3} \times (39{,}1 + 54{,}9 + 4 \times 16{,}0) = 0{,}79$ g.

**b.** Pour effectuer cette dissolution, nous avons besoin d'une fiole jaugée de 500 mL, d'une spatule, d'une coupelle de pesée et d'une balance.

**c.**




**d.** On obtient une droite passant par l'origine, en accord avec l'équation $A = kc$,

avec $k = 2{,}2.10^3$ L.mol$^{-1}$.

La loi de Beer-Lambert est ainsi vérifiée.

**e.** La longueur d'onde de travail doit correspondre au maximum d'absorption des ions permanganate, soit 530 nm d'après le spectre donné.

**f.** D'après ce spectre, à 530 nm, l'absorbance est égale à 2,5. Pour les différentes solutions étalons, les absorbances sont plus faibles. Or $A = 2{,}2.10^3\ c$. Le spectre a donc été réalisé avec une solution bien plus concentrée que toutes les solutions étalons.

**g.** On utilise la relation entre $A$ et $c$ : $A = 2{,}2.10^3\ c$.
D'où $c_{exp} = \dfrac{A_D}{2{,}2.10^3} = \dfrac{0{,}14}{2{,}2.10^3} = 6{,}4.10^{-5}\ \text{mol.L}^{-1}$.

**h.** D'après l'étiquette, il y a 0,0010 g de permanganate de potassium dans 100 mL d'eau de Dakin.

$$c = \frac{n}{V} = \frac{m}{MV}$$

$$c = \frac{0{,}0010}{(39{,}1 + 54{,}9 + 4 \times 16{,}0) \times 100.10^{-3}}$$

$$= 6{,}3.10^{-5}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**i.** L'écart relatif vaut $\dfrac{\left|c_{exp} - c\right|}{c}$

$$\text{écart relatif} = \frac{6{,}4.10^{-5} - 6{,}3.10^{-5}}{6{,}3.10^{-5}} = 0{,}016 \text{ soit } 2\%.$$

## 16 Dosage des ions fer (II) dans un médicament

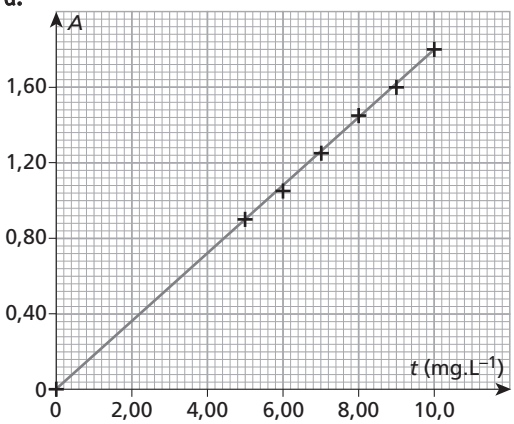
**2.a.** Le prélèvement du volume de solution S doit être effectué précisément, il faudra donc utiliser la burette graduée. Le volume de solution d'OPHEN sera ajouté à la pipette jaugée de 2,00 mL. La solution 1 sera préparée dans une fiole jaugée de 50,0 mL.

**b.** Lors de la dilution, la masse d'ions fer (II) se conserve, d'où $t\ V_S = t_1\ V_1$ où $t = 20{,}0\ \text{mg.L}^{-1}$ est la concentration massique en ions fer (II) dans S, $V_S = 25{,}0$ mL le volume de solution S à prélever pour préparer la solution 1, $t_1$ la concentration massique en ions fer (II) dans la solution 1 et $V_1$ le volume total de solution 1 à préparer. D'où $t_1 = \dfrac{t V_S}{V_1}$

$$t_1 = \frac{20{,}0 \times 25{,}0}{50{,}0} = 10{,}0\ \text{mg.L}^{-1}.$$

**c.** Sachant que l'objectif du dosage est la détermination de la concentration des ions fer (II), il faut que tous ces ions soient transformés en ions $Fe(OPHEN)_3^{2+}$ dont l'absorbance permettra la détermination de la concentration par spectrophotométrie. Pour cela, les ions fer (II) doivent être le réactif limitant et donc l'orthophénanthroline doit être introduite en excès.

**d.**




**e.** En modélisant la courbe précédente, on obtient une droite de régression d'équation $A = 0{,}179\ t$ où $A$ est sans unité et $t$ en $\text{mg.L}^{-1}$.

**3.a.** L'enrobage contient un colorant susceptible d'absorber la lumière à la longueur d'onde de travail et donc de fausser les mesures d'absorbance de la solution $S_x$. En effet, il ne faut mesurer que l'absorbance due aux ions $Fe(OPHEN)_3^{2+}$.

**b.** En utilisant la relation $A = 0{,}179\ t$ :

$$t_X = \frac{A_X}{0{,}179}$$

$$t_X = \frac{1{,}35}{0{,}179} = 7{,}54\ \text{mg.L}^{-1}.$$

**c.** La solution $S_X$ a été préparée par dilution de la solution $S_0$. Le facteur de dilution est $F = \dfrac{c_{fille}}{c_{mère}}$

$$F = \frac{50{,}0}{5{,}00} = 10.$$

D'où $t_0 = 10\ t_X$

$t_0 = 10 \times 7{,}54 = 75{,}4\ \text{mg.L}^{-1}$.

**d.** L'intégralité des ions fer (II) du comprimé ont été dissous dans 1000,0 mL de solution $S_0$.
Sachant que $t_0 = 75{,}4\ \text{mg.L}^{-1}$, le comprimé contient 75,4 mg d'ions fer (II).

**e.** L'écart relatif vaut $\dfrac{\left|m - m_{exp}\right|}{m}$ où $m$ est la masse d'ions fer (II) dans un comprimé indiquée par l'étiquette et $m_{exp} = 75{,}4$ mg, la masse d'ions fer (II) dans un comprimé déterminée expérimentalement.

$$\text{Donc écart relatif} = \frac{80 - 75{,}4}{80} = 0{,}055 \text{ soit } 6\%.$$

**f.** L'équation de dissolution du sulfate de fer (II) hydraté est :

$$FeSO_4,\ xH_2O \rightarrow Fe^{2+} + SO_4^{2-} + xH_2O.$$

La quantité de matière d'ions fer (II) en solution est donc égale à la quantité de matière de sulfate de fer (II) hydraté dans le comprimé.

$$\text{On en déduit : } \frac{m'}{M(FeSO_4, xH_2O)} = \frac{m}{M(Fe^{2+})}$$

où $m' = 256{,}30$ mg est la masse de sulfate de fer hydraté dans un comprimé et $m = 80$ mg la masse d'ions fer (II).

$$m'\ M(Fe) = m\ [M(Fe) + M(S) + 4\ M(O) + xM(H_2O)]$$

$$x = \frac{\dfrac{m'\,M(Fe)}{m} - M(Fe) - M(S) - 4M(O)}{M(H_2O)}$$

$$x = \frac{\dfrac{256{,}30.10^{-3} \times 55{,}8}{80.10^{-3}} - 55{,}8 - 32{,}1 - 4 \times 16{,}0}{18{,}0} = 1{,}5.$$

## 17 Produit d'entretien de lentilles

**a.** C'est un dosage par étalonnage conductimétrique.

**b.** Seules les espèces chimiques ioniques participent à la conductivité de la solution étudiée. Le peroxyde d'hydrogène $H_2O_2$ n'étant pas une espèce ionique (ni une espèce qui peut produire des ions en solution), sa présence ne gênera pas l'étude.

**c.** Pour préparer la première solution, il faut diluer d'un facteur $F = 2{,}0$ car :

$F = \dfrac{c_{\text{mère}}}{c_{\text{fille}}} = \dfrac{c_0}{c_1}$, $F = \dfrac{0{,}10}{5{,}0.10^{-2}} = 2{,}0$.

Protocole : prélever 50,0 mL de solution $S_0$ à l'aide d'une pipette jaugée. Les introduire dans une fiole jaugée de 100,0 mL, ajouter de l'eau, homogénéiser, compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge. Homogénéiser.

**d.** On obtient une droite passant par l'origine, ce qui correspond à la relation $\sigma = kc$, conformément à la loi de Kohlrausch.

**e.** En utilisant le graphique, on détermine la concentration molaire $c_S$ du chlorure de sodium dans S : il suffit de placer l'ordonnée $\sigma_S = 1{,}8$ mS.cm$^{-1}$ sur la droite de régression puis de lire l'abscisse correspondante : $c_S = 15$ mmol.L$^{-1}$.

La solution commerciale ayant été diluée 10 fois pour préparer la solution S, la concentration molaire $c$ du chlorure de sodium dans la solution commerciale se calcule ainsi :

$c = 10\ c_S$

$c = 10 \times 15.10^{-3} = 0{,}15$ mol.L$^{-1}$.

**f.** $c_m = c\ M(\text{NaCl})$

$c_m = 0{,}15 \times (23{,}0 + 35{,}5) = 8{,}8$ g.L$^{-1}$.

**g.** D'après les résultats expérimentaux, la masse de chlorure de sodium $m_{exp}$ présente dans 100 mL de solution commerciale est $m_{exp} = c_m\ V$

$m_{exp} = 8{,}8 \times 100.10^{-3} = 0{,}88$ g.

L'écart relatif vaut $\dfrac{|m - m_{exp}|}{m}$ où $m$ est la masse de chlorure de sodium dans 100 mL de solution d'après la notice du produit commercial.

écart relatif $= \dfrac{0{,}88 - 0{,}85}{0{,}85} = 0{,}035$ soit 4 %.

---

## 18 Dosage de l'urée dans des eaux d'alimentation

*Analyse de la question*

La synthèse demandée doit décrire le principe d'un dosage spectrophotométrique par étalonnage, dans le cas où l'espèce à doser est incolore. Pour cela, une réaction chimique préalable de l'espèce dosée avec un réactif spécifique est nécessaire pour former une espèce colorée en même quantité que l'espèce chimique dosée. Il ne reste alors plus qu'à réaliser un dosage spectrophotométrique classique, en choisissant convenablement la longueur d'onde de travail pour qu'elle corresponde au maximum d'absorption de la nouvelle espèce chimique colorée formée.

*Pistes de réponses et mots-clés*

| | |
|---|---|
| **But** | **Dosage spectrophotométrique par étalonnage** d'une **espèce non colorée.** |
| **Formation d'une espèce colorée** | Réaction de **formation d'une espèce colorée : ajout d'un réactif spécifique en excès** ⇒ formation de l'espèce colorée en même quantité que l'espèce incolore dosée. |
| **Protocole du dosage par étalonnage** | • **Choix de la longueur d'onde** : elle correspond au **maximum d'absorption de l'espèce colorée formée**.<br>• **Préparation de la gamme d'étalonnage** : par **dilutions** d'une solution mère d'urée de concentration connue et ajout du réactif spécifique en excès dans chacune des **solutions filles** (tout comme dans la solution dosée).<br>• **Zéro :** effectuer **le blanc** avec une solution contenant le solvant utilisé pour préparer les solutions étalons ainsi que le réactif spécifique ajouté en excès.<br>• Réalisation des **mesures d'absorbance** pour chaque solution de la gamme et pour la solution dosée.<br>• Tracé de la **courbe d'étalonnage** et **modélisation.** |
| **Exploitation du dosage** | Utilisation de la courbe d'étalonnage (**figure 3** page 471) : pour $A = 5{,}00.10^{-3}$, on trouve $\boldsymbol{c_{urée} = 11\ ng.L^{-1}}$. |

**LIEN UTILE**

http://www.sca.cnrs.fr/sca/rub/recherche/posters/habidi.pdf

Chapitre 19

# Dosages par titrage

## Introduction au chapitre (p. 472)

Ce chapitre intervient dans le thème *Agir* du programme de Terminale S.

Le contrôle de la qualité est une activité essentielle dans l'industrie et peut être réalisé à partir de dosages. Les dosages par étalonnage (non destructifs) ont fait l'objet du chapitre précédent et les dosages par titrage direct (destructifs) font l'objet du présent chapitre. C'est l'occasion de réinvestir les notions rencontrées antérieurement comme les réactions d'oxydo-réduction, vues en Première S ou, plus récemment, les réactions acido-basiques. La pH-métrie et la conductimétrie seront réemployées à des fins de suivi (pH ou conductivité $\sigma$ de la solution).

L'équivalence d'un titrage est définie et la détermination du volume équivalent se fait soit sur des courbes de suivi pH-métrique ou conductimétrique, soit à l'aide d'un indicateur de fin de réaction (acido-basique ou autre).

La détermination de la relation entre les quantités de matière des différents réactifs à l'équivalence est faite soit à partir d'un tableau d'avancement, soit en utilisant la stœchiométrie.

Enfin, les calculs d'incertitude relative et absolue sont réinvestis dans ce chapitre lors de la détermination des quantités de matière ou des concentrations inconnues.

## Activités

### 1 Introduction aux titrages (p. 474)

ANALYSE D'EXPÉRIENCE

#### *Objectif*

Le but de cette activité est de faire réfléchir l'élève à partir d'un protocole expérimental de titrage afin qu'il puisse en extraire l'équation support du titrage.

Deux exemples sont traités : une réaction de précipitation et une réaction acido-basique.

#### *Correspondance avec le programme*

Établir l'équation de la réaction support de titrage à partir d'un protocole expérimental.

#### *Corrigé*

**1.a.** Les précipités qui peuvent *a priori* se former sont obtenus en combinant tous les cations avec tous les anions. Il vient donc : NaCl, $Na_2SO_4$, $CaCl_2$, $CaSO_4$, $BaCl_2$ et $BaSO_4$.

Cependant, étant donné que les ions $Na^+$, $Ca^{2+}$, $Cl^-$ et $SO_4^{2-}$ coexistent dans l'eau minérale sans précipiter, les solides NaCl, $Na_2SO_4$, $CaCl_2$, $CaSO_4$ ne peuvent pas se former lors du titrage. De même pour $BaCl_2$ puisque la solution titrante est du chlorure de baryum. Le seul précipité possible est donc $BaSO_4$.

**b.** L'équation chimique support du titrage est donc : $Ba^{2+}_{(aq)} + SO_4^{2-}{}_{(aq)} \rightarrow BaSO_{4(s)}$.

**c.** À l'équivalence, la stœchiométrie de la réaction indique que la quantité de matière en ions $Ba^{2+}$ ajoutée doit être égale à la quantité de matière en ions $SO_4^{2-}{}_{(aq)}$ initialement présente dans les 50 mL d'eau minérale. Donc $n_{éq} = n_1$, soit $c_2\ V_{éq} = c_1\ V_1$ où $c_1$ est la concentration inconnue en ions sulfate dans l'eau minérale.

D'où $c_1 = \dfrac{c_2 V_{éq}}{V_1}$

$$c_1 = \frac{1{,}00.10^{-2} \times 7{,}4}{50{,}0} = 1{,}5.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

**2.a.** Les ions présents sont $Na^+$ et $HO^-$ dans le déboucheur et $H_3O^+$ et $Cl^-$ dans l'acide chlorhydrique.

**b.** La réaction support du titrage est donc une réaction acido-basique.

**c.** Son équation est $H_3O^+ + HO^- \rightarrow 2\ H_2O$.

## 2 Déterminer le degré d'acidité d'un vinaigre (p. 475)

### *Objectif*

Le but de cette activité expérimentale est de déterminer la concentration de l'acide éthanoïque contenu dans un vinaigre, puis son degré d'acidité *d* à l'aide d'un titrage acido-basique. On a choisi d'utiliser conjointement un dispositif pH-métrique ainsi qu'un indicateur de fin de réaction, la phénolphtaléine, pour permettre une réflexion sur l'utilisation des indicateurs de fin de réaction. Au fur et à mesure de l'ajout de solution titrante, le volume versé ainsi que la couleur de la solution sont notés.

Dans un premier temps, la méthode pH-métrique permet de tracer la courbe pH = $f(V)$. Vient ensuite l'exploitation de cette courbe afin de déterminer l'équivalence puis, à l'aide de la stœchiométrie de la réaction, la concentration recherchée. Dans un second temps, la couleur prise par la solution tout au long du titrage permet de réfléchir quant à l'utilisation d'un indicateur coloré pour repérer l'équivalence.

Un calcul d'incertitude relative puis la détermination de l'intervalle de confiance du degré d'acidité *d* sont aussi réalisés lors de cette activité.

### *Correspondance avec le programme*

- Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce chimique par titrage par le suivi d'une grandeur physique et par la visualisation d'un changement de couleur, dans le domaine du contrôle de la qualité.
- Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.

### *Liste de matériel*

**Par binôme :**

- Une fiole jaugée de 100 mL.
- Une pipette jaugée de 10 mL.
- Une poire d'aspiration.
- Un bécher de 100 mL.
- Une burette graduée de 25 mL avec son support.
- Un barreau magnétique avec son système d'agitation magnétique.
- Un pH-mètre étalonné avec son électrode de verre et son support.

### *Liste des produits*

**Par binôme :**

- De la phénolphtaléine.
- De l'eau distillée.

**Pour la classe :**

- Du vinaigre de vin blanc (environ 180 mL pour 18 binômes).
- Une solution d'hydroxyde de sodium de concentration 0,100 ± $3.10^{-3}$ mol.$L^{-1}$ (environ 450 mL pour 18 binômes).

### *Corrigé*

▶ On réalise une dilution au dixième du vinaigre commercial de concentration $c$ en acide éthanoïque. Lors d'une dilution, la quantité de matière de soluté se conserve. D'où $cV_P = c'V_F$ soit $V_P = \frac{c'V_F}{c} = \frac{V_F}{10}$.

Avec $V_F$ = 100,0 mL, $V_P$ = 10,0 mL.

Le volume de vinaigre commercial à prélever $V_P$ est donc égal à 10,0 mL.

On ajoute 20 mL d'eau distillée afin d'immerger correctement les électrodes.

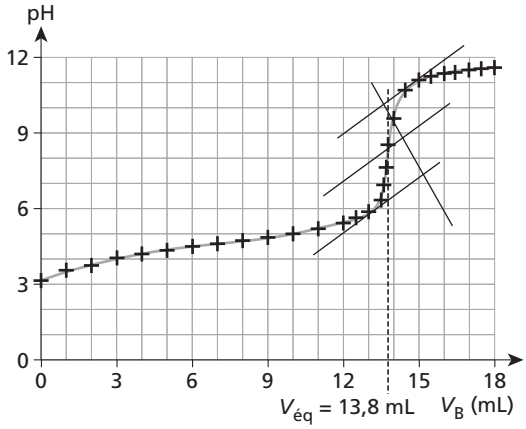
▶ On obtient le tableau suivant :

| $V_B$ (en mL) | pH | Couleur |
|---|---|---|
| 0 | 3,12 | incolore |
| 1 | 3,52 | incolore |
| 2 | 3,74 | incolore |
| 3 | 4,01 | incolore |
| 4 | 4,18 | incolore |
| 5 | 4,32 | incolore |
| 6 | 4,46 | incolore |
| 7 | 4,58 | incolore |
| 8 | 4,71 | incolore |
| 9 | 4,81 | incolore |
| 10 | 5,00 | incolore |
| 11 | 5,18 | incolore |
| 12 | 5,41 | incolore |
| 12,5 | 5,59 | incolore |
| 13 | 5,83 | incolore |
| 13,5 | 6,31 | incolore |
| 13,6 | 6,9 | incolore |
| 13,7 | 7,6 | incolore |
| 13,8 | 8,5 | fuchsia |
| 14 | 9,55 | fuchsia |
| 14,5 | 10,65 | fuchsia |
| 15 | 11 | fuchsia |
| 15,5 | 11,18 | fuchsia |
| 16 | 11,3 | fuchsia |
| 16,5 | 11,37 | fuchsia |
| 17 | 11,43 | fuchsia |
| 17,5 | 11,48 | fuchsia |
| 18 | 11,51 | fuchsia |

**a.** La réaction de titrage a lieu entre l'acide éthanoïque et l'ion hydroxyde :

$CH_3COOH + HO^- \rightarrow CH_3COO^- + H_2O$.

**b.** On obtient le graphe suivant :




**c.** À l'aide de la méthode des tangentes, on trouve : $V_{éq} = 13{,}8$ mL.

**d.** À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques.

On a, en notant $n_A$ la quantité de matière d'acide éthanoïque initialement introduite et $n_B$ celle d'ions $HO^-$ versée à l'équivalence :

$$n_A = n_B \text{ soit } c'V_{S'} = c_B V_{éq} \text{ et } c' = \frac{c_B V_{éq}}{V_{S'}}$$

$$c' = \frac{0{,}100 \times 13{,}8}{10{,}0} = 0{,}138 \text{ mol.L}^{-1}.$$

On a dilué 10 fois la solution commerciale donc $c = 10\,c'$ soit $c = 1{,}38$ mol.L$^{-1}$.

**e.** D'après la définition du degré d'acidité, il faut déterminer la masse d'acide éthanoïque dans 100 g de vinaigre. 100 g de vinaigre représentent un volume $V_v$ égal à :

$$V_v = \frac{m}{\rho} \text{ soit } V_v = \frac{100}{1{,}0} = 1{,}0.10^2 \text{ mL}.$$

Dans un tel volume, il y a $n = cV_v$

$n = 1{,}38 \times 0{,}100 = 0{,}138$ mol d'acide éthanoïque.

Cela correspond à une masse d'acide éthanoïque de masse molaire $M$ :

$m = nM$ soit $m = 1{,}38.10^2 \times 60{,}0 = 8{,}28$ g.

Le degré d'acidité vaut alors $d = 8{,}28$.

**f.** L'incertitude relative sur $d$ vaut :

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta c_B}{c_B} + \frac{\Delta V_{éq}}{V_{éq}} + \frac{\Delta V_{S'}}{V_{S'}} + \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta V_F}{V_F} + \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{3.10^{-3}}{0{,}100} + \frac{0{,}1}{13{,}8} + \frac{0{,}05}{10{,}0} + \frac{0{,}05}{10{,}0} + \frac{0{,}5}{100} + \frac{0{,}05}{1}$$

$$= 0{,}102$$

et $\Delta d = 0{,}102 \times 8{,}28 = 0{,}85$.

On obtient alors : $d = 8{,}28 \pm 0{,}85$.

L'étiquette indique un degré d'acidité de 8 %. On constate que la valeur théorique est proche de la valeur expérimentale.

**g.** La zone de changement de teinte de la phénolphtaléine est contenue dans le saut de pH. Ainsi, cet indicateur de fin de réaction est approprié pour repérer l'équivalence.

***Commentaire***

Ce protocole permet de montrer aux élèves plusieurs méthodes de détermination du volume équivalent :

- le virage de l'indicateur de fin de réaction,
- l'abscisse du point correspondant au saut de pH,
- la méthode des tangentes,
- l'utilisation du tableur qui permet de tracer la fonction dérivée $\frac{dpH}{dV}$, dont l'abscisse de l'extremum correspond au volume équivalent.

Ces différentes méthodes donnent la même valeur.

## 3 Titrage conductimétrique d'un sérum physiologique (p. 476)

***Objectif***

Le but de cette activité est de déterminer la concentration en chlorure de sodium dans un sérum physiologique. Pour cela, un titrage conductimétrique est mis en œuvre. Dans un premier temps, l'exploitation de la courbe expérimentale $\sigma = f(V)$ permet de déterminer le volume versé à l'équivalence et, à l'aide de la stœchiométrie de la réaction, on peut remonter à la concentration recherchée. Dans un second temps, la courbe conductimétrique est étudiée et on cherche à interpréter le changement de pente observé.

***Correspondance avec le programme***

- Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce chimique par titrage par le suivi d'une grandeur physique et par la visualisation d'un changement de couleur, dans le domaine de la santé.

• Interpréter qualitativement un changement de pente dans un titrage conductimétrique.

### *Liste de matériel*

**Par binôme :**

• Une pipette jaugée de 10 mL.
• Une poire d'aspiration.
• Un bécher de 150 mL.
• Une éprouvette graduée.
• Une burette graduée de 25 mL et son support.
• Un barreau magnétique avec son système d'agitation magnétique.
• Un conductimètre étalonné avec sa cellule et son support.

### *Liste des produits*

**Pour la classe :**

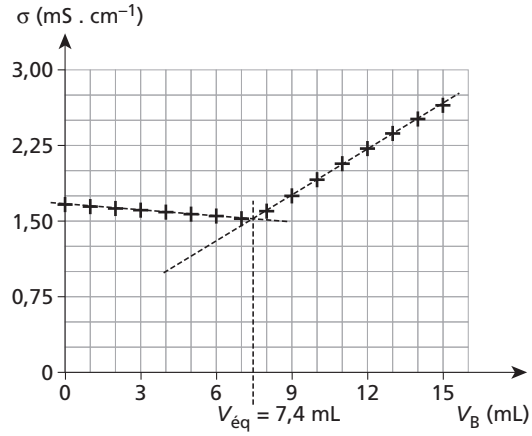
• De l'eau distillée.
• Du sérum physiologique (environ 180 mL pour 18 binômes).
• Une solution de nitrate d'argent de concentration 0,20 mol.L$^{-1}$ (environ 450 mL pour 18 binômes).

### *Corrigé*

**1.** Les valeurs obtenues sont réunies dans le tableau suivant :

| $V$ (mL) | $\sigma$ (mS.cm$^{-1}$) |
|---|---|
| 0 | 1,664 |
| 1 | 1,647 |
| 2 | 1,627 |
| 3 | 1,608 |
| 4 | 1,589 |
| 5 | 1,570 |
| 6 | 1,550 |
| 7 | 1,531 |
| 8 | 1,590 |
| 9 | 1,750 |
| 10 | 1,916 |
| 11 | 2,074 |
| 12 | 2,226 |
| 13 | 2,372 |
| 14 | 2,513 |
| 15 | 2,651 |

**a.** On obtient le graphe suivant :




**b.** On constate que la courbe se présente en deux parties qui peuvent être modélisées par deux demi-droites.

**c.** Les coordonnées du point d'intersection sont (7,4 ; 1,50). L'abscisse 7,4 mL correspond au volume versé à l'équivalence.

**d.** Lors du titrage, les ions argent ajoutés réagissent avec les ions chlorure initialement présents et forment un précipité de chlorure d'argent. L'équation support est donc $Ag^+ + Cl^- \rightarrow AgCl$.

**2.a.** Un ajout stœchiométrique signifie que l'ajout se fait dans les proportions de quantités de matière dictées par l'équation chimique de la réaction.

**b.** Lors de l'ajout stœchiométrique, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. On a donc $n_{Cl^-} = n_{Ag^+}$.

**c.** La relation précédente s'écrit alors :

$$c_1 V_1 = c_2 V_{éq} \text{ et } c_1 = \frac{c_2 V_{éq}}{V_1}$$

$$c_1 = \frac{0{,}20 \times 7{,}4.10^{-3}}{10{,}0.10^{-3}} = 0{,}15 \text{ mol.L}^{-1}.$$

Il y a autant d'ions chlorure que d'ions sodium dans le sérum physiologique. Ainsi, la concentration molaire $c$ en chlorure de sodium du sérum physiologique vaut 0,15 mol.L$^{-1}$.

**3.a.** On trouve en solution les ions chlorure et sodium présents dans le sérum physiologique ainsi que les ions nitrate et argent introduits lors de l'ajout du nitrate d'argent.

**b.** Les ions $Na^+$ n'interviennent pas dans l'équation du titrage, et ne sont pas non plus ajoutés par la solution titrante.

Leur quantité de matière ne varie pas et puisque la variation de volume est négligeable. Leur concentration n'a donc pas de raison de varier. Avant l'équivalence, les ions $Ag^+$ sont limitants. La solution contient donc l'excès d'ions $Cl^-$, les ions $NO_3^-$ ajoutés avec les ions $Ag^+$ et les ions $Na^+$ qui ne participent pas à la réaction. Après l'équivalence, il n'y a plus de réaction chimique. La solution s'enrichit donc en ions $NO_3^-$ et $Ag^+$ (en plus des ions $Na^+$ présents depuis le début).

**c.** Puisque le volume total ne varie pas, avant l'équivalence, $[Cl^-]$ diminue alors que $[NO_3^-]$ augmente. Comme $\lambda_{Cl^-}$ est peu différente de $\lambda_{NO3^-}$, l'expression de la conductivité montre que sa valeur est peu modifiée, ce qui est vérifié expérimentalement.

**d.** Après l'équivalence, les concentrations de certains ions augmentent (et aucune ne diminue). L'expression de la conductivité montre que $\sigma$ doit augmenter, ce qui est vérifié expérimentalement.

**e.** Le point de changement de pente correspond à l'état du mélange pour lequel les réactifs sont dans les proportions stœchiométriques.

### *Commentaires*

• Por la question **2.c.** dans le commerce, la concentration d'un sérum physiologique est généralement donnée en $g.L^{-1}$. La concentration massique $c_m$ de la solution étudiée peut être déduite à partir de la concentration molaire obtenue expérimentalement : sachant que le chlorure de sodium a pour masse molaire $M = 58{,}5\ g.mol^{-1}$, $c_m = cM$

$c_m = 0{,}15 \times 58{,}5 = 8{,}7\ g.L^{-1}$.

La valeur théorique est de $9\ g.L^{-1}$ : on constate que la valeur expérimentale est proche.

• Pour la question **3.a.** les ions $H_3O^+$ et $HO^-$ sont négligés dans cette approche. En revanche, il faut donner la liste des quatre ions, même si trois seulement sont présents simultanément.

## Exercices

## Applications

### 1 Titrage de l'acide lactique

**a.** La solution titrante est la solution d'hydroxyde de sodium et le réactif titrant est l'ion hydroxyde car il s'agit d'un titrage acide-base, que l'ion $Na^+$ n'a pas de propriété acido-basique et que la concentration de la solution d'hydroxyde de sodium est connue.

**b.** La solution titrée est la solution d'acide lactique.

**c.** Il s'agit ici d'une réaction entre un acide et une base. L'équation de la réaction support du titrage s'écrit : $C_3H_6O_3 + HO^- \rightarrow C_3H_5O_3^- + H_2O$.

### 2 Titrage des ions éthanoate

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 3 Titrage rédox

**a.** La demi-équation relative au couple $I_2/I^-$ est : $I_2 + 2\ e^- \rightleftharpoons 2\ I^-$.

**b.** La demi-équation relative au couple $S_4O_6^{2-}/S_2O_3^{2-}$ est $S_4O_6^{2-} + 2\ e^- \rightleftharpoons 2\ S_2O_3^{2-}$.

**c.** Pour écrire l'équation de la réaction support du titrage, il faut combiner les deux demi-équations précédentes tout en pensant à inverser le sens de la deuxième :

$I_2 + 2\ e^- \rightleftharpoons 2\ I^-$

$2\ S_2O_3^{2-} \rightleftharpoons S_4O_6^{2-} + 2\ e^-$

Soit $I_2 + 2\ S_2O_3^{2-} \rightarrow 2\ I^- + S_4O_6^{2-}$.

### 4 Courbe pH-métrique

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 5 Courbe dérivée

**a.** L'abscisse de l'extremum correspond au volume versé à l'équivalence : $V_{éq} = 11{,}4$ mL.

**b.** Pour une demi-graduation, on a une incertitude sur le volume qui est égale à $\Delta V = 0{,}2$ mL soit $V_{éq} = 11{,}4 \pm 0{,}2$ mL.

### 6 Titrage conductimétrique

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 7 Iodométrie

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 8 Titrage acido-basique

**a.** Le changement de couleur a lieu pour 9,3 mL de solution titrante versés donc $V_{éq} = 9{,}3$ mL.

**b.** À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. Ainsi, la quantité de matière d'ammoniac $n_B$ versée à l'équivalence est égale à celle d'acide éthanoïque $n_A$ introduite : $n_B = n_A$ soit $c_B V_B = c_A V_{éq}$.

**c.** On obtient alors : $c_B = \dfrac{c_A V_{éq}}{V_B}$

$c_B = \dfrac{0{,}30 \times 9{,}3}{25{,}0} = 0{,}11\ mol.L^{-1}$.

### 9 Lequel choisir ?

**a.** Le saut de pH est suffisamment vertical pour lire directement son abscisse : $V_{éq} = 16{,}5$ mL.

**b.** Le pH équivalent s'obtient par la méthode des tangentes : on trouve $pH_{éq} = 6{,}6$.

**c.** La zone de virage d'un indicateur de fin de réaction correspond à la zone de pH dans laquelle l'indicateur de fin de réaction passe de la couleur de sa forme acide à la couleur de sa forme basique.

**d.** La zone de virage de l'indicateur de fin de réaction doit être contenue dans l'étendue du saut du pH. On constate que le vert de bromocrésol est adapté.

## Entraînement

### 10 Courbe pH-métrique

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 640.*

### 11 Ions sulfate dans une eau minérale

**1.a.** Les ions sulfate réagissent avec les ions baryum : $SO_4^{2-}{}_{(aq)} + Ba^{2+}{}_{(aq)} \rightarrow BaSO_{4(s)}$.

**b.** À l'équivalence du titrage, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. D'après l'équation, on a donc $n_{Ba^{2+}} = n_{SO_4^{2-}}$.

**c.** On obtient : $c_2 V_{éq} = c_1 V_1$ et $c_1 = \dfrac{c_2 V_{éq}}{V_1}$

$$c_1 = \frac{1{,}5.10^{-2} \times 11{,}7}{15{,}0} = 0{,}012 \text{ mol.L}^{-1}.$$

**2.a.** Avant le titrage, les ions présents en solution sont les ions sulfate.

**b.** La concentration des ions sulfate est égale à $c_1$.

**c.** Dans l'état 2, on a ajouté des ions baryum et chlorure. Les ions chlorure sont spectateurs et ne réagissent pas.

Ainsi, il y a en solution : $n_{Cl^-} = 2c_2V$

$$n_{Cl^-} = 2 \times 1{,}5.10^{-2} \times 1{,}0.10^{-3} = 3{,}0.10^{-5} \text{ mol.}$$

Le volume total $V_T$ est égal à 16,0 mL et la concentration $\left[Cl^-\right] = \dfrac{n_{Cl^-}}{V_T}$

$$\left[Cl^-\right] = \frac{3{,}0.10^{-5}}{16{,}0.10^{-3}} = 1{,}9.10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}.$$

On a aussi ajouté $1{,}5.10^{-5}$ mol d'ions baryum. Ces ions ont réagi avec les ions sulfate initialement présents.

Il reste alors :

$$n_{SO_4^{2-}} = c_1V_1 - c_2V = c_2V_{éq} - c_2V = c_2(V_{éq} - V)$$

$$n_{SO_4^{2-}} = 1{,}5.10^{-2} \times (11{,}7.10^{-3} - 1{,}0.10^{-3})$$

$$= 1{,}6.10^{-4} \text{ mol.}$$

$$\left[SO_4^{2-}\right] = \frac{n_{SO_4^{2-}}}{V_T}$$

$$\left[SO_4^{2-}\right] = \frac{1{,}6.10^{-4}}{16{,}0.10^{-3}} = 0{,}010 \text{ mol.L}^{-1}.$$

**d.** Dans l'état 1, la conductivité est donnée par la relation : $\sigma_1 = \lambda_{SO_4^{2-}}\left[SO_4^{2-}\right] = \lambda_{SO_4^{2-}} c_1$.

Dans l'état 2, la conductivité est donnée par la relation :

$$\sigma_2 = \lambda_{SO_4^{2-}}\left[SO_4^{2-}\right] + \lambda_{Cl^-}\left[Cl^-\right]$$

$$\sigma_2 = \lambda_{SO_4^{2-}} \frac{c_1V_1 - c_2V}{V_T} + \lambda_{Cl^-} \frac{2c_2V}{V_T}.$$

La différence de conductivité entre les deux états s'écrit :

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 = \lambda_{SO_4^{2-}} \frac{c_1V_1 - c_2V}{V_T} + \lambda_{Cl^-} \frac{2c_2V}{V_T} - \lambda_{SO_4^{2-}} c_1$$

$$\Delta\sigma = \lambda_{SO_4^{2-}} \frac{c_1V_1 - c_1V_T - c_2V}{V_T} + (2\lambda_{Cl^-}) \frac{c_2V}{V_T}$$

$$\Delta\sigma = \lambda_{SO_4^{2-}} \left(\frac{-c_1V - c_2V}{V_T}\right) + (2\lambda_{Cl^-}) \frac{c_2V}{V_T}$$

$$\Delta\sigma = -\lambda_{SO_4^{2-}} \frac{(c_1 + c_2)V}{V_T} + (2\lambda_{Cl^-}) \frac{c_2V}{V_T}.$$

**e.**

$$\sigma_2 - \sigma_1 = -16{,}0.10^{-3} \times \frac{(1{,}17.10^1 + 1{,}5.10^1) \times 1{,}0.10^{-3}}{16{,}0.10^{-3}}$$

$$+ 2 \times 7{,}63.10^{-3} \times \frac{1{,}5.10^1 \times 1{,}0.10^{-3}}{16{,}0.10^{-3}}$$

$$\sigma_2 - \sigma_1 = -0{,}012 \text{ S.m}^{-1}.$$

Avant l'équivalence, la conductivité diminue.
La pente de la courbe est négative.

**f.** Après l'équivalence, il n'y a plus d'ions sulfate. Les ions chlorure ajoutés en solution ne sont pas consommés et leur concentration en solution augmente. La conductivité augmente donc après l'équivalence.

**g.** À la rupture de pente, on se trouve à l'instant du titrage où les ions sulfate ont tous été consommés et où il n'y a pas encore d'excès d'ions chlorure.

## Approfondissement

### 12 Construction d'une courbe de titrage

**1.a.** L'équation de la réaction chimique est :
$H_3O^+ + HO^- \rightarrow 2\ H_2O$.

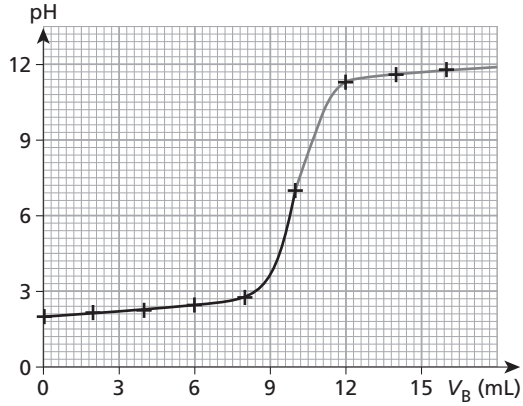
**b.** La quantité de matière $n_A$ d'ions $H_3O^+$ ne varie pas après l'ajout d'eau.
Ainsi, $n_A = c_A\ V_A n_A = 1{,}0 \times 10.10^{-3} = 1{,}0.10^{-2}$ mol.

**c.** $\left[H_3O^+\right] = \dfrac{n_A}{V_t}$

$\left[H_3O^+\right] = \dfrac{1{,}0.10^{-2}}{1{,}00} = 1{,}0.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$.

D'où pH = – log[$H_3O^+$]pH = – log(1,0.10$^{-2}$)= 2,00.

**d.**




**e.** Pour un volume de base égal à 2,0 mL, on a apporté en solution :
$n_B = c_B\ V_B$
$n_B = 1{,}0 \times 2{,}0.10^{-3} = 2{,}0.10^{-3}$ mol.
D'après l'équation de la réaction, ces ions sont immédiatement consommés et il reste en solution :
$n'_A = n_A - n_B$
$n'_A = 1{,}0.10^{-2} - 2{,}0.10^{-3} = 8.10^{-3}$ mol.
Le volume total est inchangé car
1,00 + 0,0020 = 1,00 L.
Ainsi, $\left[H_3O^+\right] = \dfrac{n'_A}{V_t}$

$\left[H_3O^+\right] = \dfrac{8{,}0.10^{-3}}{1{,}00} = 8{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

D'où pH = – log[$H_3O^+$]pH = – log($8.10^{-3}$) = 2,1.

**f.** On consigne les résultats dans le tableau suivant :

| $V_B$ (mL) | 4,0 | 6,0 | 8,0 |
|---|---|---|---|
| $n_{H_3O^+}$ restante (mmol) | 6 | 4 | 2 |
| $[H_3O^+]$ ($10^{-3}$ mol.L$^{-1}$) | 6 | 4 | 2 |
| pH | 2,2 | 2,4 | 2,7 |

**g.** Pour $V_B$ = 10,0 mL, la quantité de matière d'ions hydroxyde apportée vaut :
$n''_B = c_B\ V_B$
$n''_B = 10{,}0.10^{-3} \times 1{,}0 = 1{,}0.10^{-2}$ mol.
On constate que cette valeur est identique à la quantité initiale en ions $H_3O^+$.
Il ne reste plus en solution d'ions hydroxyde et oxonium mais des ions chlorure et sodium.
Il s'agit d'une solution d'eau salée, dont le pH est égal à 7,0.

**h.** Pour $V_B$ = 12,0 mL, on a consommé la totalité des ions oxonium avec 10,0 mL d'ions hydroxyde. Les 2,0 mL supplémentaires sont donc en excès. Cela correspond à une quantité de matière égale à :
$n_B = 1{,}0 \times 2{,}0.10^{-3} = 2{,}0.10^{-3}$ mol.

**i.** Le volume total de solution est égal à :
$V$ = 1,00 + 0,012 = 1,01 L.
La concentration en ions hydroxyde vaut alors :

$\left[HO^-\right] = \dfrac{n_B}{V_t}$

$\left[HO^-\right] = \dfrac{2{,}0.10^{-3}}{1{,}01} = 2{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

**j.** D'après le produit ionique de l'eau,
$K_e = [H_3O^+]\ [HO^-]$, on peut en déduire $[H_3O^+]$ :

$\left[H_3O^+\right] = \dfrac{K_e}{\left[HO^-\right]}$

$\left[H_3O^+\right] = \dfrac{1{,}0.10^{-14}}{2{,}0.10^{-3}} = 5{,}0.10^{-12}$ mol.L$^{-1}$.

Le pH vaut alors :
pH = – log[$H_3O^+$]
pH = 11,30.

**k.** De la même manière, on obtient :
• Pour $V_B$ = 14,0 mL :
On a consommé la totalité des ions oxonium avec 10,0 mL d'ions hydroxyde.
Les 4,0 mL supplémentaires sont donc en excès.
Cela correspond à une quantité de matière égale à :
$n_A = 1{,}0 \times 4{,}0.10^{-3} = 4{,}0.10^{-3}$ mol.
Le volume total de solution est égal à :
$V$ = 1,00 + 0,014 = 1,01 L,
la concentration en ions hydroxyde vaut alors :

$\left[HO^-\right] = \dfrac{n_B}{V_t}$

$\left[HO^-\right] = 4{,}0.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

D'après le produit ionique de l'eau,
$K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$, on peut en déduire $[H_3O^+]$ :

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{K_e}{\left[HO^-\right]}$$

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{4{,}0.10^{-3}} = 2{,}5.10^{-12}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

Le pH vaut alors :
$pH = -\log[H_3O^+]$ soit $pH = 11{,}60$.

• Pour $V_B = 16{,}0$ mL :

On a consommé la totalité des ions avec 10,0 mL d'ions hydroxyde.
Les 6,0 mL supplémentaires sont donc en excès. Cela correspond à une quantité de matière égale à :
$n_{HO^-} = 1{,}0 \times 6{,}0.10^{-3} = 6{,}0.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}$.
Le volume total de solution est égal à :
$V = 1{,}00 + 0{,}016 = 1{,}02$ L,
la concentration en ions hydroxyde vaut alors :

$$\left[HO^-\right] = \frac{n_B}{V_t}$$

$$\left[HO^-\right] = 6{,}0.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

D'après le produit ionique de l'eau,
$K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$, on peut en déduire $[H_3O^+]$ :

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{K_e}{\left[HO^-\right]}$$

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{6{,}0.10^{-3}} = 1{,}7.10^{-12}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

Le pH vaut alors :
$pH = -\log[H_3O^+]$ soit $pH = 11{,}78$.

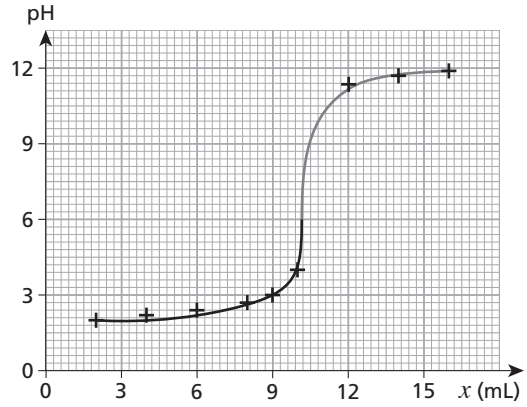
**2.a.** Pour un volume de base $x$ inférieur à 10 mL (c'est-à-dire inférieur au volume équivalent), la quantité de matière d'ions $HO^-$ apportée en solution est $n_B = xc_B$. D'après l'équation de la réaction, ces ions sont immédiatement consommés et la quantité restante d'ions $H_3O^+$ en solution est : $n'_A = n_A - n_B = V_A\,c_A - xc_B$.

**b.** Compte tenu de la précision que nous avons sur le volume $V_t = 1{,}00$ L et sachant que $x < 10$ mL, le volume total est quasi-inchangé.
Ainsi :

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{n'_A}{V_t} = \frac{V_A c_A - xc_B}{V_t} = (V_A c_A - xc_B)\ \text{mol.L}^{-1}$$

puisque $V_t = 1{,}00$ L.
On a donc $pH = -\log\left[H_3O^+\right] = -\log(V_A c_A - xc_B)$.

**c.** $pH = -\log(0{,}010 - x.10^{-3})$ avec $x$ en mL.




**d.** Pour un volume de base $x$ supérieur à 10 mL, la quantité de matière d'ions $HO^-$ apportée en solution est :

$$n_B = V_B\,c_B = xc_B > n_A.$$

Les ions $H_3O^+$ sont totalement consommés et il reste en solution :
$n'_B = n_B - n_A = xc_B - V_A\,c_A$.
La concentration en ions hydroxyde vaut alors :

$$\left[HO^-\right] = \frac{n'_B}{V_t} = \frac{xc_B - V_A c_A}{V_t}.$$

Compte tenu de la précision que nous avons sur le volume $V_t$, le volume total est alors égal à $(1{,}00 + x)$ L.
Numériquement :

$$\left[HO^-\right] = \frac{x.10^{-3} - 0{,}010}{1{,}00 + x.10^{-3}},\ \text{avec } x \text{ en mL.}$$

**e.** D'après le produit ionique de l'eau,
$K_e = [H_3O^+]\,[HO^-]$,
on peut en déduire $\left[H_3O^+\right] = \dfrac{K_e}{\left[HO^-\right]}$

$$\left[H_3O^+\right] = \frac{1{,}0.10^{-14}}{\dfrac{x.10^{-3} - 0{,}010}{1{,}00 + x.10^{-3}}}$$

$$= 1{,}0.10^{-14} \times \frac{1{,}00 + x.10^{-3}}{x.10^{-3} - 0{,}010}.$$

On obtient :
$pH = -\log[H_3O^+]$

$$pH = -\log\left(1{,}0.10^{-14} \times \frac{1{,}00 + x.10^{-3}}{x.10^{-3} - 0{,}010}\right).$$

**f.** L'allure de ce graphe correspond à ce qui a été obtenu dans la partie **1.**

# Exercices de BAC

## 13 Titre alcalimétrique d'une eau minérale

**1.a.** L'eau minérale correspond, sur cette courbe, au point d'abscisse $V = 0$ mL. Son pH est donc 7.

**b.** Puisque pH < $pK_a$ (valeur donnée en rabat de couverture, $pK_a = 10{,}3$), alors la forme prédominante du couple $HCO_3^-/CO_3^{2-}$ est l'ion hydrogénocarbonate $HCO_3^-$.

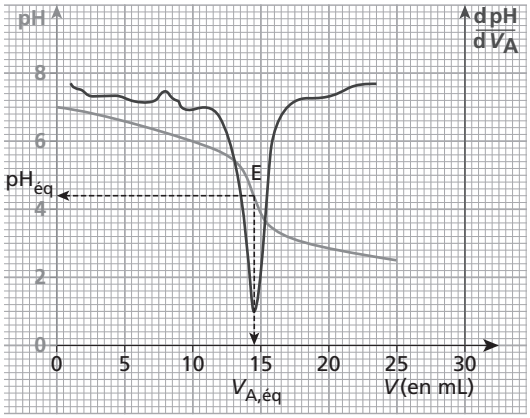
**c.** Dans une eau de pH = 7, la phénolphtaléine est sous forme acide incolore.

**d.** L'ajout d'acide chlorhydrique acidifie le mélange. La phénolphtaléine conserve sa teinte acide et reste donc incolore.

**e.** La définition du TA présuppose que la phénolphtaléine est initialement colorée et que le volume équivalent est obtenu pour sa décoloration. Celle-ci étant obtenue pour un volume nul, le TA l'est également.

**2.a.** La réaction support du titrage a lieu entre les ions hydrogénocarbonate et les ions $H_3O^+$. Son équation est donc : $HCO_3^- + H_3O^+ \rightarrow CO_{2(aq)} + 2\ H_2O$.

**b.** L'abscisse de la courbe dérivée correspond au volume versé à l'équivalence.
Ainsi, les coordonnées du point d'équivalence E sont ($V_{A,éq} = 14{,}5$ mL ; $pH_{éq} = 4{,}4$).




**c.** La zone de virage du vert de bromocrésol est contenue dans le saut de pH. Cet indicateur coloré est donc approprié.

**d.** À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. Donc la quantité de matière en $H_3O^+$ versée $n_A$ est égale à la quantité de matière en $HCO_3^-$ initialement présente $n_B$ : $n_A = n_B$, soit $c\,V = c_A\,V_{A,\,éq}$.

D'où $c = \dfrac{c_A V_{A,éq}}{V}$

$$c = \frac{2{,}0.10^{-2} \times 14{,}5.10^{-3}}{50{,}0.10^{-3}} = 5{,}8.10^{-3}\ \text{mol.L}^{-1}.$$

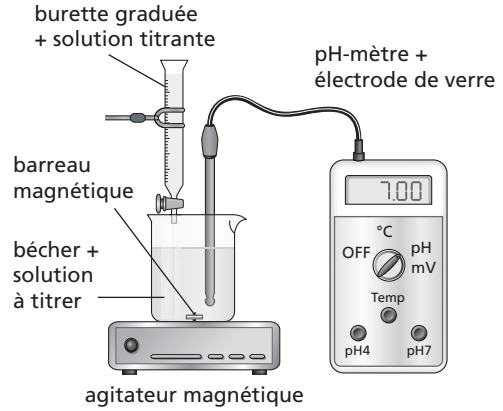
**e.** La masse molaire de l'ion hydrogénocarbonate vaut 61,0 g.mol$^{-1}$. La concentration massique $c_m$ vaut donc :

$c_m = cM = 5{,}8.10^{-3} \times 61 = 0{,}35$ g.L$^{-1}$.

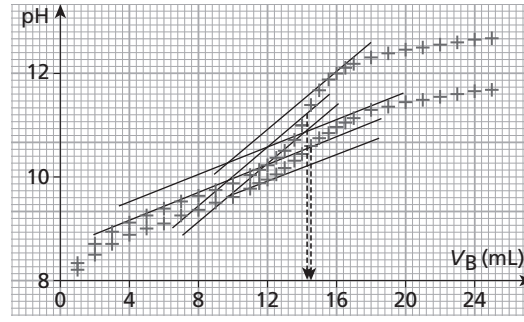
**f.** D'après la définition, il aurait donc fallu un volume double, soit 28,0 mL, pour titrer 100 mL d'eau minérale. Le TAC de cette eau est donc de 29,0 mL.

## 14 Détermination de la teneur en élément azote N d'un engrais

**1.a.** Soit le schéma suivant :




**b.** À l'aide de la méthode des tangentes, on trouve E (14,4 ; 11,7).




**c.** Pour la courbe la plus pentue, l'incertitude absolue $\Delta V_{éq}$ est de 1 carreau, soit 0,4 mL. Pour la seconde courbe, $\Delta V_{éq}$ est de 1 mL.

**d.** La courbe de titrage correspondant au bécher $B_1$ est plus exploitable que celle correspondant au bécher $B_2$ et c'est ce titrage du bécher $B_1$ qu'il aurait fallu faire.

**2.a.** À l'équivalence, les ions ammonium et hydroxyde ont disparu.
Il reste l'ammoniac formé ainsi que les ions spectateurs nitrate et sodium.

**b.** À l'équivalence, $n_0(NH_4^+) = n_e(HO^-) = c_B V_e$.

**c.** $n_0(NH_4^+) = 0{,}20 \times 14{,}4.10^{-3} = 2{,}9.10^{-3}$ mol.

**d.** $n_0(NH_4^+)$ est la quantité de matière dans 10 mL de S. Dans 250 mL, cette quantité est 25 fois plus grande, soit $n(NH_4^+) = 25 \times 2{,}9.10^{-3} = 0{,}072$ mol. Cela correspond aussi à la quantité de nitrate d'ammonium contenue dans la fiole, c'est-à-dire dans les 6,0 g dissous.

**3.a.** Une mole de nitrate d'ammonium contient deux moles d'élément chimique azote, soit 28,0 g d'azote.

**b.** La masse d'azote dans l'échantillon est donc $m_N = 28{,}0 \times 0{,}072 = 2{,}0$ g.

**c.** 6,0 g d'engrais contiennent 2,0 g d'azote, soit $p = 100 \times \dfrac{2{,}0}{6{,}0} = 33$ %.
Cette valeur est peu différente des 34,4 % affichés par le fabricant.

**4.a.** La concentration $c_B$ vaut 0,20 mol.L$^{-1}$.
L'incertitude absolue $\Delta c_B$ vaut 0,005 mol.L$^{-1}$.
La masse molaire de l'azote vaut 14,0 g.mol$^{-1}$ et l'incertitude absolue $\Delta M$ est égale à 0,05 g.mol$^{-1}$.

**b.** La masse d'engrais $m$ est connue au décigramme, l'incertitude absolue $\Delta m$ vaut donc 0,1 g.

**c.** $\dfrac{\Delta p}{p} = \dfrac{\Delta V_{éq}}{V_{éq}} + \dfrac{\Delta c_B}{c_B} + \dfrac{\Delta V_S}{V_S} + \dfrac{\Delta m}{m} + \dfrac{\Delta V}{V} + \dfrac{\Delta M}{M}$

$\dfrac{\Delta p}{p} = \dfrac{0{,}1}{14{,}4} + \dfrac{0{,}005}{0{,}20} + 0{,}002 + \dfrac{0{,}1}{6{,}0} + 0{,}002 + \dfrac{0{,}05}{14{,}0}$

$= 0{,}056$.

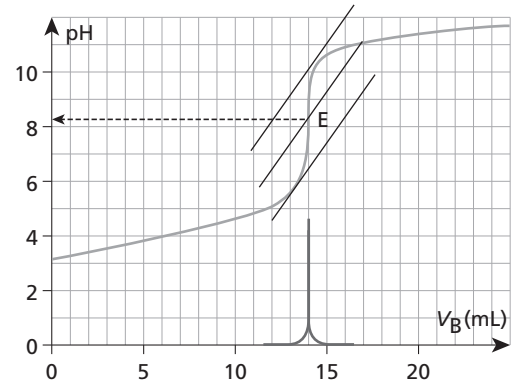
Ainsi, $\Delta p = 0{,}056\ p = 1{,}87$ %.

**d.** L'intervalle de confiance avec lequel le pourcentage $p$ est déterminé vaut : $33 \pm 2$ %.
La valeur affichée par le fabricant se trouve bien dans cet intervalle de confiance.

## 15 Titrage de l'acide ascorbique

**a.** L'équation est $AH + HO^- \rightarrow A^- + H_2O$.

**b.** La méthode de la courbe dérivée donne E (14,0 ; 8,3).
Pour le volume équivalent, le saut de pH est suffisamment vertical pour qu'une lecture directe soit précise. Pour le pH à l'équivalence, la méthode des tangentes donne pH = 8,3.




**c.** À l'équivalence, l'acide AH a été totalement consommé, de même que les ions $HO^-$ introduits en solution. Il reste des ions $A^-$ (et des molécules d'eau $H_2O$).

**d.** À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques donc

$c_A\ V_A = c_B\ V_{B,\,éq}$. D'où $c_A = \dfrac{c_B V_{B,éq}}{V_A}$

$c_A = \dfrac{2{,}00.10^{-2} \times 14{,}0}{10{,}0} = 2{,}80.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$.

**e.** La masse de vitamine C présente dans un comprimé, c'est-à-dire dans les 100 mL de solution contenue dans la fiole, est donc : $m = c_A\ V\ M$
$m = 2{,}80.10^{-2} \times 0{,}1000 \times 176 = 0{,}493$ g.
L'écart relatif vaut $100 \times \left|\dfrac{500 - m}{500}\right| = 1{,}4$ %.

**f.** L'eau ajoutée dans le bécher permet à l'électrode pH-métrique d'être bien immergée mais cela ne modifie pas la quantité de matière d'acide ascorbique. La quantité de matière d'ions hydroxyde ajoutée à l'équivalence n'en est donc pas modifiée et le volume équivalent non plus.

**g.** L'indicateur coloré permet, en changeant de teinte, de déterminer le volume équivalent. Il faut en ajouter quelques gouttes en solution afin de ne pas modifier de façon importante le pH de la solution. De plus, il faut que la zone de virage de l'indicateur coloré soit contenue dans le saut de pH. Le seul qui respecte ici cette condition est le rouge de crésol.

## 16 Analyse d'un lait

**1.a.** Le passage de $S_0$ à S est une dilution au cours de laquelle la conservation de la quantité de matière s'exprime par $c_S V_S = c_0 V_0$ soit $\frac{c_0}{c_S} = \frac{V_S}{V_0}$

$\frac{c_0}{c_S} = \frac{100}{20,0} = 5,00.$

**b.** Un peu de solution diluée, introduite dans un petit bécher, est prélevée à l'aide d'une pipette jaugée de 10 mL munie d'une poire d'aspiration et versée dans un bécher. L'ajout de 250 mL d'eau ne nécessitant pas de précision particulière, une éprouvette graduée est utilisée.

**c.** La présence des ions chlorure (et d'autres) permet d'expliquer que la conductivité de la solution ne soit pas nulle.

**2.a.** Avant l'équivalence, les ions $Ag^+$ sont limitants. La solution contient donc l'excès d'ions $Cl^-$ (qui diminue), les ions $NO_3^-$ ajoutés avec les ions $Ag^+$ (dont la quantité augmente) et les ions $K^+$ qui ne participent pas à la réaction (dont la concentration reste constante).

Après l'équivalence, il n'y a pas de réaction chimique. La solution s'enrichit donc en ions $NO_3^-$ et $Ag^+$ (en plus des ions $K^+$ et $Na^+$ présents depuis le début).

**b.**

| | Avant l'équivalence | Après l'équivalence |
|---|---|---|
| $[Na^+]$ et $[K^+]$ | constante | constante |
| $[NO_3^-]$ | augmente | augmente |
| $[Ag^+]$ | nulle | augmente |
| $[Cl^-]$ | diminue | nulle |

**c.** Entre 0 et 10 mL, c'est-à-dire avant l'équivalence, les seuls termes qui varient dans l'expression de la conductivité sont $\lambda_{NO3^-}[NO_3^-]$ et $\lambda_{Cl^-}[Cl^-]$. Or, $[Cl^-]$ diminue autant que $[NO_3^-]$ augmente. Comme $\lambda_{Cl^-}$ est peu différent de $\lambda_{NO3^-}$, l'expression de la conductivité montre que sa valeur est peu modifiée, ce qui est le cas expérimentalement.

**d.** Au-delà de 12,5 mL, c'est-à-dire après l'équivalence, les concentrations de certains ions augmentent (et aucune ne diminue). L'expression de la conductivité montre que $\sigma$ doit augmenter, ce qui est le cas expérimentalement.

**e.** Ce point particulier correspond à l'équivalence du titrage puisqu'il achève la phase du titrage où $Cl^-$ finit de disparaître.

**3.a.** En prolongeant les deux demi-droites qui modélisent les deux portions de courbe, on constate que celles-ci se coupent au point équivalent. L'abscisse de ce point donne $V_{2E}$ : $V_{2E} = 12,0$ mL.

**b.** À l'équivalence, les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques. La quantité de matière d'ions $Ag^+$ versée à l'équivalence $n_{Ag^+}$ est égale à la quantité de matière initiale $n_{Cl^-}$ d'ions chlorure. On a : $n_{Ag^+} = n_{Cl^-}$ soit $c_S V_S = c_2 V_{2E}$.

**c.** On a alors $c_S = \frac{c_2 V_{2E}}{V_S}$

$c_S = \frac{5,00.10^{-3} \times 12,0}{10,0} = 6,00.10^{-3}$ mol.L$^{-1}$.

D'après la relation de la question **a.**, on a $c_0 = 5c_S$

$c_0 = 3,00.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$.

**d.** Dans un litre de lait, on a $3,00.10^{-2}$ mol d'ions chlorure soit une masse de 1,07 g. Le lait titré correspond aux critères de l'énoncé.

**4.a.** L'équation de la réaction support du titrage est : $HA + HO^- \rightarrow A^- + H_2O$.

**b.** La quantité de matière $n_{AH}$ d'acide lactique initialement présente et la quantité de matière $n_B$ d'ions $HO^-$ versée à l'équivalence sont égales.

On a donc : $n_{HA} = n_B$ soit $n_{HA} = c_B V_B$

$n_{AH} = 5,00.10^{-2} \times 12,0.10^{-3} = 6,0.10^{-4}$ mol.

Dans un litre du lait étudié, il y a une masse d'acide lactique HA égale à :

$m_{HA} = 50\ n_{HA}\ M_{HA}$

$m_{HA} = 50 \times 6,0.10^{-4} \times 90 = 2,7$ g.

Cette valeur est supérieure à 1,8 g donc le lait n'est pas frais !

## Rédiger une synthèse de documents

### 17 Comprendre un titrage

*Analyse de la question*

La synthèse demande d'expliciter le principe théorique d'un titrage et sa mise en œuvre expérimentale. L'accent doit être mis sur la notion de stœchiométrie et sur les objets utilisés lors de titrage. Une comparaison entre burette et balance est proposée. Les différentes idées qui doivent être présentes dans la synthèse figurent dans le tableau suivant.

*Pistes de réponses et mots-clés*

| | |
|---|---|
| **Stœchiométrie** | **Définition** (1797) **:**<br>Étude des proportions selon lesquelles les corps se combinent entre eux.<br>**Étymologie** : racine grecque *stoekheion*, « élément principe » et *-métrie*, « mesure ».<br>**Sens :** mesure de la quantité d'éléments chimiques impliqués dans la combinaison chimique.<br>**Proportions stœchiométriques** : les réactifs et les produits se trouvent dans les proportions de quantités de matière dictées par l'équation chimique. |
| **Titrage** | Technique expérimentale qui permet de déterminer une concentration ou une quantité de matière inconnue d'une espèce chimique en solution.<br>En général, le **réactif titrant**, de concentration connue, est introduit avec une burette dans le **réactif titré** de concentration inconnue.<br>La **réaction support de titrage** met en jeu le réactif titrant et le réactif titré. |
| **Matériel utilisé** | Une **burette graduée** permet de verser progressivement le réactif titrant dans la solution titrée tout en suivant le volume ajouté.<br>Ne pas utiliser une burette mais une balance aurait les inconvénients suivants :<br>• coût (une balance coûte bien plus cher qu'une burette),<br>• il faudrait de toute façon un dispositif pour ajouter le réactif titrant,<br>• il faudrait organiser l'agitation différemment,<br>• il faudrait connaître avec précision la masse volumique de la solution titrante pour déterminer le volume de solution titrante versé.<br>Une **pipette jaugée munie d'un dispositif d'aspiration** permet de mesurer précisément le volume de solution titrée.<br>Pour rester homogène, le milieu réactionnel doit être agité, **par exemple avec une agitation magnétique**. |
| **Équivalence** | À l'**équivalence** du titrage, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques. Le réactif limitant change de nature. |
| **Repérage de l'équivalence** | L'équivalence se repère de différentes manières :<br>• à l'aide d'un **indicateur de fin de réaction** qui change de couleur à l'équivalence,<br>• à l'aide d'une **courbe de pH-métrie** si la réaction de titrage est une réaction acido-basique,<br>• à l'aide d'une **courbe de conductimétrie** si la réaction de titrage met en jeu des ions. |

Chapitre 20

# Synthèses organiques

## Introduction au chapitre (p. 496)

Après deux chapitres consacrés à la compréhension plutôt théorique de la chimie organique, que ce soit pour se familiariser avec de nouvelles représentations spatiales des molécules (chapitre 12 ) ou pour découvrir les mécanismes de transformation chimique (chapitre 13), ce chapitre, inscrit dans la partie *Agir* du programme, explore la stratégie élaborée par le chimiste pour synthétiser les molécules de son choix.

Si l'élève a déjà, au cours de sa scolarité, été confronté à de nombreux protocoles en chimie générale et organique, ce chapitre est l'occasion de lui fournir un cadre plus systématique pour la lecture d'un protocole et de lui transmettre des outils d'analyse qui lui permettront de prévoir ses manipulations en toute sécurité et efficacité. Ce chapitre n'a donc pas comme but premier de s'étendre sur les gestes techniques à effectuer lors de la manipulation à proprement parler (ces techniques de filtration, distillation… bénéficient de fiches méthodes à la fin du livre de l'élève), mais d'apprendre à maîtriser le protocole pour comprendre l'enchaînement des différentes étapes et éviter une application passive des instructions.

Le chapitre repose donc sur l'analyse de protocoles, que nous avons proposé de découper artificiellement en quatre grandes étapes :

**La réaction** : après avoir identifié la réaction à réaliser, l'élève doit comprendre le rôle des espèces introduites (solvants, réactifs, catalyseur), s'approprier les choix des paramètres expérimentaux (température, pH…) et finalement proposer un montage, cohérent avec les choix précédents, pour effectuer la réaction. À ce niveau, une réflexion sur les risques et coûts associés peut être mise en place.

**Le traitement** : le milieu réactionnel est soumis à une suite de traitements ayant pour but principal d'isoler le composé d'intérêt, souvent sous forme de produit brut.

**Les techniques de purification** : lors de cette étape, le chimiste souhaite passer d'un produit brut à un produit purifié, en enlevant les impuretés, les produits non désirés (sous-produits, une notion introduite dans le chapitre de chimie verte) ou les réactifs n'ayant pas réagi.

**Les techniques d'analyse** : le chimiste doit être capable de fournir des faisceaux d'indices qui lui permettent de statuer à la fois sur la nature et sur la pureté du produit synthétisé (c'est l'occasion de réinvestir les techniques d'UV, d'IR et de RMN figurant au programme, mais aussi d'employer des techniques d'analyse connues telles que CCM ou mesures de températures de changement d'état). Une fois en possession de ces éléments, le chimiste peut calculer un rendement de la réaction.

Une liste précise des techniques expérimentales attendues ne figure pas explicitement dans le programme. Nous avons fait le choix de rester proches des techniques figurant dans les anciens programmes.

L'élève, à présent capable de comparer les différentes étapes de deux protocoles afin de souligner leurs avantages et leurs inconvénients, a pu apprécier la démarche stratégique que le chimiste doit mettre en œuvre d'un point de vue pratique pour synthétiser une molécule. Le deuxième volet de ce chapitre, qui ne comporte pas de compétences exigibles mais une capacité d'extraire et d'exploiter des documents, souligne les stratégies que le chimiste est amené à développer non plus d'un point de vue pratique, mais d'un point de vue théorique lorsqu'il envisage la réaction qu'il souhaite effectuer. À partir d'un composé polyfonctionnel pouvant conduire à plusieurs produits, dont un seul est désiré, deux techniques sont proposées pour aboutir sélectivement au produit désiré : le recours à des réactifs chimiosélectifs et à la protection de fonction.

Ces compétences ambitieuses permettent à l'élève de comprendre la difficulté dans la mise en place de certaines réactions et les solutions élégantes que les chimistes ont su proposer.

La protection de fonction en synthèse peptidique est un sujet extrêmement vaste et potentiellement pointu d'un point de vue technique. Nous avons proposé l'approche la plus simple possible, en omettant sciemment certains aspects et développements qui ont marqué le développement de la synthèse peptidique, en particulier son automatisation à l'aide d'un support solide en résine. L'important, à nos yeux, est d'insister sur la capacité du chimiste d'obtenir l'enchaînement d'acide aminé souhaité, en travaillant dans un premier temps sur l'obtention d'un dipeptide et ensuite en élargissant à des peptides plus grands.

## Activités

## 1 Synthèses de l'aspirine (p. 498)

### *Objectif*

Cette activité est axée sur la comparaison de deux protocoles aboutissant à la synthèse de l'acide acétylsalicylique (aspirine) : le premier procède par estérification de l'acide salicylique à l'aide d'un anhydride, le second utilise un chlorure d'acyle. Il s'agit, dans un premier temps, d'une synthèse classique au niveau terminale, qu'il peut être intéressant de mettre en œuvre au cours d'une séance de travaux pratiques.

Si le TP n'est pas réalisé, les résultats de la CCM doivent être fournis aux élèves. Le second protocole ne se prête pas aussi bien à une séance de travaux pratiques.

Il est fourni afin d'initier une comparaison des deux protocoles.

Le premier se prête à une analyse des étapes qui le constituent, et l'élève est amené à justifier certains choix expérimentaux (verrerie sèche, rôle d'un composé, paramètres expérimentaux, choix d'une technique de purification puis d'analyse).

Un second protocole, qui requiert une plus grande attention au niveau de la sécurité, est alors proposé afin de le comparer au précédent.

### *Correspondance avec le programme*

• Comparer les avantages et les inconvénients de deux protocoles.

• Pratiquer une démarche expérimentale pour synthétiser une molécule organique d'intérêt biologique à partir d'un protocole.

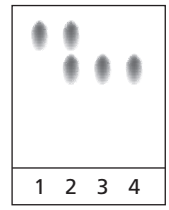
• Effectuer une analyse critique de protocoles expérimentaux pour identifier les espèces mises en jeu, leurs quantités et les paramètres expérimentaux.

• Justifier le choix des techniques de synthèse et d'analyse utilisées.

• Identifier des réactifs et des produits à l'aide de spectres et de tables fournis.

### *Liste de matériel*

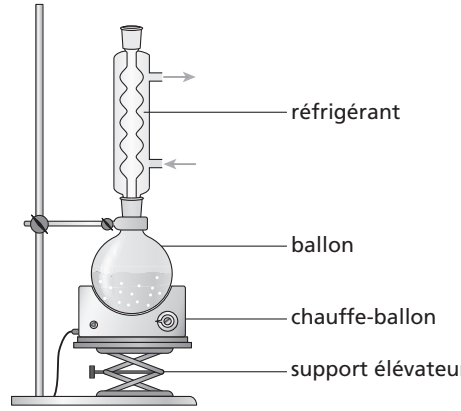
CCM à fournir aux élèves :



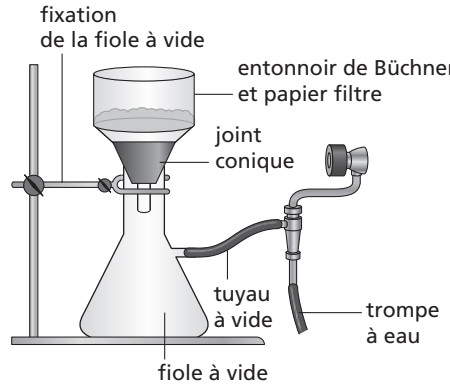

1 : acide salicylique
2 : produit brut
3 : produit recristallisé
4 : aspirine commerciale

### *Corrigé*

**1.a.** Pour le montage à reflux




Pour la filtration sous vide :




**b.** La **synthèse** correspond aux deux premiers points de la partie 1, lorsque les réactifs et catalyseur sont introduits et que le milieu réactionnel est chauffé. Des étapes de traitement sont alors réalisées : cristallisation et filtration.

La **purification a lieu lors** de la recristallisation dans de l'éthanol.

L'**analyse** est réalisée par CCM.

**c.** L'anhydride éthanoïque réagit (lentement) au contact de l'eau d'après sa fiche de sécurité. De l'eau sur la paroi du ballon réagirait donc par cette réaction parasite au lieu d'être consommée par la réaction souhaitée. Le rendement de la synthèse serait alors plus faible.

*Remarque :* en présence d'eau l'anhydride acétique forme 2 molécules d'acide acétique, cette réaction parasite ne modifie donc pas les étapes de traitement du milieu réactionnel, ce qui est utilisé dans la suite du protocole. Dans les faits, cette hydrolyse est lente.

**d.** L'acide sulfurique concentré n'intervient pas dans l'équation de la réaction : il s'agit d'un catalyseur.

**e.** Les quantités de matière, $n$, introduites :

• en acide salicylique (AS) :

$$n(\text{AS}) = \frac{m(\text{AS})}{M(\text{AS})}$$

$$n(\text{AS}) = \frac{5{,}0}{138{,}12} = 3{,}6.10^{-2} \text{ mol}$$

• en anhydride éthanoïque (AE) :

$$n(\text{AE}) = \frac{m(\text{AE})}{M(\text{AE})} = \frac{V(\text{AE})\rho(\text{AE})}{M(\text{AE})}$$

avec $V$(AE) le volume en mL d'anhydride introduit :

$$n(\text{AE}) = \frac{7{,}0 \times 1{,}08}{102{,}09} = 7{,}4.10^{-2}\text{mol}$$

L'anhydride éthanoïque est ainsi introduit en excès.

En fin de réaction, il reste dans le milieu réactionnel de l'anhydride éthanoïque, l'acide sulfurique concentré, ainsi que les produits de réactions, à savoir l'acide acétylsalicylique et l'acide acétique.

*Remarque :* en introduisant l'anhydride éthanoïque en excès, le chimiste s'affranchit dans une certaine mesure de l'éventuelle perte d'anhydride lors de sa réaction parasite avec l'eau.

**f.** L'utilisation d'un catalyseur permet d'accélérer la réaction.

De même en utilisant un montage à reflux, le chimiste augmente la température du milieu, qui est un facteur cinétique.

*Remarque :* les déplacements d'équilibre ne figurant plus au programme, les réponses attendues sont d'un point de vue cinétique et non thermodynamique (on ne considère pas que la constante d'équilibre dépend de la température).

**g.** En ajoutant de l'eau dans le milieu, le chimiste ajoute non seulement un solvant qui permet de faire précipiter l'acide acétylsalicylique, mais il fait également réagir l'anhydride éthanoïque pour former de l'acide acétique. Il ne reste alors plus d'anhydride dans le milieu réactionnel, sans pour autant qu'une autre espèce apparaisse, l'acide éthanoïque étant un sous produit de la réaction souhaitée. Il facilite les étapes de traitement du produit brut.

**h.** L'acide acétylsalicylique, ou aspirine, est peu soluble dans l'eau froide (2,5 $g.L^{-1}$ à 15 °C), il sera donc amené à cristalliser dans ces conditions.

**i.** D'après la CCM fournie, le produit brut contient encore de l'acide salicylique (tâche de plus grand Rf) ainsi que du produit désiré (tâche de plus petit Rf). La recristallisation est donc nécessaire.

*Remarque :* Il peut arriver que la CCM du produit brut soit satisfaisante, mais de l'acide éthanoïque et de l'eau s'y trouve de toute façon. Il est toujours nécessaire d'effectuer une recristallisation. D'un point de vue pédagogique, pour illustrer l'effet de la recristallisation sur la CCM, la durée de chauffage peut être réduite pour qu'il reste de l'acide salicylique dans le produit brut. Il est, bien sûr, possible de rebondir sur le TP du chapitre 11 correspondant.

**j.** Les composés à séparer migrent différemment sur une CCM, il serait donc envisageable d'utiliser une colonne de chromatographie pour purifier le produit désiré.

---

**k.**

| Déplacement chimique | Intégration | Multiplicité | Attribution et commentaire |
|---|---|---|---|
| 2,2 ppm | 3H | singulet | $H^A$ : Il s'agit d'un signal typique d'un groupe $-CH_3$ de part son intégration et sa multiplicité. Son déplacement indique qu'il est proche d'une C=O |
| 8 ppm | 4H | multiplet | $H^B$ : le déplacement et la forme du multiplet sont caractéristique du cycle dans la molécule (cycle aromatique) |
| 12 ppm | 1H | singulet | $H^C$ : son déplacement indique qu'il s'agit d'un proton d'un groupe acide carboxylique. |

Le spectre du réactif comporte aussi les pics vers 8 et 12 ppm. Par contre la présence du signal à 2,2 ppm, qui serait absent montre que le produit obtenu n'est pas le réactif. La correspondance avec les intégrations attendues est un bon critère de pureté.

**2.a.** Les risques associés au chlorure d'acétyle sont indiqués sur la **figure 1** p. 498 du manuel de l'élève. Il est inflammable et corrosif. Il faut le manipuler avec gants et lunettes, sous hotte. Il faut également le tenir éloigné de toute source d'eau.

Le dichlorométhane est nocif et susceptible de causer des cancers. Il est à manipuler sous hotte avec gants et lunettes.

La triéthylamine est inflammable et corrosive. Les mêmes précautions que pour le dichlorométhane doivent être mises en place. De plus la triéthylamine possède une odeur désagréable.

*Remarque :* il est possible de donner comme base de recherche un catalogue de fournisseur, ou d'indiquer leur site internet (exemple : VWR, Sigma-Aldrich). La notion de phrases de risques et de sécurités est introduite ici en vue de familiariser les élèves avec les codes de risques internationaux.

**b.** Le chlorure d'acyle est encore plus sensible que l'anhydride acétique au contact de l'eau et réagit violemment avec cette dernière. Il ne doit donc pas y avoir de traces d'eau, y compris celles présentes dans l'atmosphère.

**c.** À des qualités et quantités comparables, l'anhydride acétique coûte 62 euros le kilo tandis que le chlorure d'acyle coûte 92 euros par kilo. De plus, le second protocole demande une attention plus soutenue aux risques liés à la synthèse.

*Remarque :* l'utilisation du chlorure d'acyle permet d'augmenter le rendement, en utilisant un excès beaucoup plus faible de chlorure d'acyle (un peu plus d'un équivalent, contre 2 équivalents pour le protocole 1)

### *Commentaires*

Il peut être intéressant de souligner la stratégie développée par les chimistes pour améliorer une réaction d'estérification. Dans un premier temps, la formation d'un ester peut se limiter à la réaction entre un acide carboxylique et un alcool. C'est alors que, pour augmenter l'efficacité de la réaction, les chimistes ont développées des espèces synthétiques destinées à être des analogues d'acide carboxylique plus réactifs : les anhydrides et les chlorures d'acyle.

## 2 Synthèse d'un anti-douleur (p. 500)

### *Objectif*

Cette activité est axée sur un protocole de synthèse d'un amide par réaction entre un anhydride et une amine qu'il est demandé à l'élève d'analyser. L'accent est mis non pas sur le choix de montage comme dans l'activité précédente, mais sur l'analyse des espèces présentes, et sur l'étape d'analyse du produit à la fois au niveau de sa nature et de sa pureté pour ensuite aboutir à un calcul de rendement.

Le choix de la technique de purification, à savoir une recristallisation, fait également l'objet d'une question.

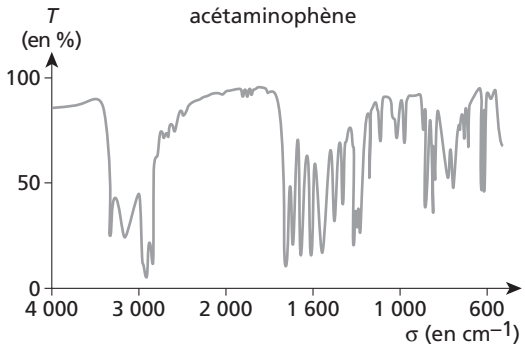
De plus le protocole a été rédigé en anglais, afin de répondre à une des exigences du programme : (*La communication internationale traitant de cette globalité a lieu de plus en plus fréquemment en anglais. Dès lors, la lecture de documents comme ceux relatifs aux protocoles expérimentaux (en synthèse organique par exemple) pourra offrir quelques occasions de se familiariser avec l'usage scientifique de cette langue*).

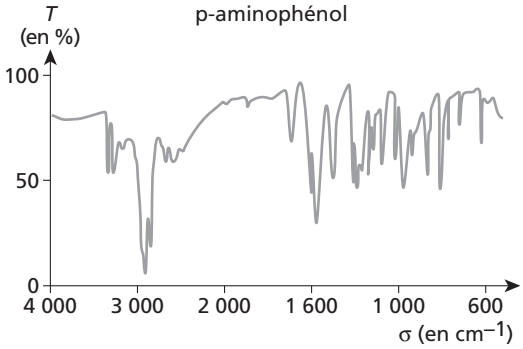
### *Correspondance avec le programme*

- Effectuer une analyse critique de protocoles expérimentaux pour identifier les espèces mises en jeu, leurs quantités et les paramètres expérimentaux.
- Justifier le choix des techniques de synthèse et d'analyse utilisées.
- Pratiquer une démarche expérimentale pour synthétiser une molécule organique d'intérêt biologique à partir d'un protocole.

### *Liste de matériel*

Spectres à fournir aux élèves :






### *Corrigé*

**a.** Il faut manipuler avec des gants et des lunettes, car plusieurs composés sont irritants. Il faut de plus se placer sous hotte, car certains composés sont dangereux pour les voies respiratoires.

**b.** Le point de fusion (*melting point*) correspond, d'après la fiche technique, à l'acétaminophène, alors que la température du p-aminophénol est plus élevée, à 189 °C. Le produit est donc pur.

**c.** La comparaison des spectres de l'acétaminophène et du p-aminophénol permet de mettre en évidence la présence d'une fonction amide dans le premier composé : liaison N—H à 3100-3500 puis 1560-1640 $cm^{-1}$ et surtout la liaison C═O à 1640-1690 $cm^{-1}$ que l'on ne retrouve pas dans le spectre du second composé.

**d.** La présence de la bande intense due à la liaison C═O indiquerait qu'il s'est formé du produit, mais l'absence des réactifs de départ et d'éventuelles impuretés ne seraient pas faciles à détecter. Une CCM pourrait être plus efficace.

**e.** Les quantités de matière, n, introduites :
en p-aminophénol (pA) :

$$n(\text{pA}) = \frac{m(\text{pA})}{M(\text{pA})} = \frac{1,5}{109} = 1,4.10^{-2}\text{mol}$$

en anhydride acétique (AA) :

$$n(\text{AA}) = \frac{m(\text{AA})}{M(\text{AE})} = \frac{V(\text{AE})d(\text{AE})}{M(\text{AE})}$$

avec $V$(AE) le volume en mL d'anhydride introduit

$$n(\text{AE}) = \frac{2,0 \text{ x } 1,08}{102} = 2,1.10^{-2}\text{mol}$$

Le p-aminophénol est donc le réactif limitant, le rendement s'écrit alors :

$$R = \frac{n(\text{A})}{n(\text{pA})}$$

où $n$(A) est la quantité de matière d'acétaminophène obtenue.

$$R = \frac{m(\text{A})}{M(\text{A}) \text{ x } n(\text{pA})}$$ avec $M$(A) la masse molaire d'acétaminophène et $m$(A) la masse en g de l'acétaminophène produit pur obtenu

$$R = \frac{m(\text{A})}{151 \text{ x } 1,4.10^{-2}} = 0,48 \times m(\text{A})$$

**f.** Le p-aminophénol, l'acide acétique et l'acide phosphorique sont solubles dans l'eau à chaud comme à froid.
L'excès d'anhydride acétique réagit avec l'eau pour donner de l'acide acétique.
Par contre, l'acétaminophène est soluble à chaud et pas à froid ; il peut donc être recristallisé dans l'eau.

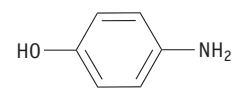
*Remarque :* l'anhydride acétique est introduit en excès car il réagit lentement avec l'eau du milieu réactionnel.

### *Commentaire*

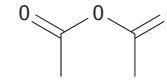
• Le composé de départ étant un composé polyfonctionnel (amine et alcool), cette réaction peut être utilisée afin de démontrer le caractère sélectif ou non d'une réaction selon les conditions expérimentales. C'est un des objectifs du chapitre.

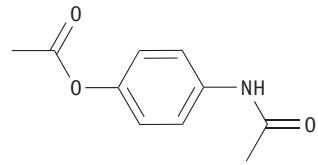
• Exemple d'exercice : réaction sélective grâce aux conditions opératoires : compétition amide/ester

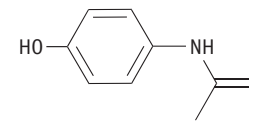
La réaction du 4-aminophénol avec un excès d'anhydride acétique conduit à la formation de A, possédant à la fois de l'ester et de l'amide. Au contraire, seul le paracétamol se forme si la réaction est conduite mole à mole en présence d'une base.



Aminophénol


Anhydride acétique


A


Paracétamol

Réflexions possibles :

**1.** Identifier les groupes caractéristiques présents sur le 4-aminophénol.

**2.** Identifier les groupes caractéristiques présents sur la molécule A

**3.** En quoi la réaction conduisant à la molécule B est-elle sélective ?

## 3 Sélectivité en chimie organique (p. 501)

### *Objectif*

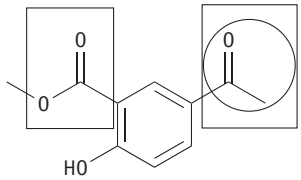
Par l'analyse d'un document, l'élève est amené à utiliser la notion de réactif chimiosélectif dans le cas de réduction en chimie organique. L'un des réactifs est le borohydrure de sodium $NaBH_4$ qui réduit de façon sélective les cétones et pas les ester, qu'il devra comparer à l'autre réactif, l'aluminohydrure de lithium $LiAlH_4$, qui réduit ces deux fonctions.

### *Correspondance avec le programme*

Extraire et exploiter des informations sur l'utilisation de réactifs chimiosélectifs pour mettre en évidence le caractère sélectif ou non d'une réaction.

### *Corrigé*

**a.**




A

**b.** Pour obtenir le produit B, seule la fonction cétone a été réduite en alcool, l'ester n'a pas été transformé. Il faut donc utiliser $NaBH_4$. Pour obtenir le produit C, dans lesquels les 2 groupes caractéristiques de A ont été réduits en hydroxyde, il faut utiliser $LiAlH_4$.

**c.** La réaction de A, qui possède plusieurs groupes caractéristiques susceptibles d'être réduits, en B ne transforme qu'un seul des groupes caractéristique. Elle est donc sélective. Ce n'est pas le cas de la transformation de A en C.

**d.** En utilisant $LiAlH_4$, le chimiste peut réduire l'ester en alcool pour effectuer la transformation de B en C.

**e.** En effectuant le spectre IR, le chimiste s'assure de l'absence de bande C═O qui apparaîtrait dans la région 1 600 à 1 800 $cm^{-1}$. Il ne peut donc pas s'agir du produit B, il y a donc de forte chance pour qu'il s'agisse bien du produit C.

### *Commentaire*

Pour aller plus loin, des variations avec d'autres composés donneurs d'hydrure, réduisant sélectivement les dérivés d'acides.

## 4 Protection de fonction dans la synthèse peptidique (p. 502)

### *Objectif*

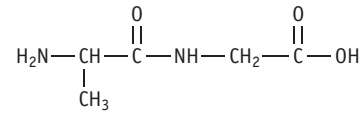
Cette activité démontre la nécessité de la protection pour obtenir un enchaînement contrôlé d'acides aminés. Pour simplifier une situation déjà compliquée, les acides aminés sont assimilés à des composés bifonctionnels (amine/acide carboxylique), c'est-à-dire que l'on ne s'intéresse pas à la nature des chaînes latérales. L'élève commence à raisonner avec le cas simple d'un dipeptide. Ensuite les problèmes qui peuvent se poser lors de l'augmentation de la chaîne sont abordés, ainsi que la notion de déprotection sélective pour libérer soit l'amine soit l'acide carboxylique.

### *Correspondance avec le programme*

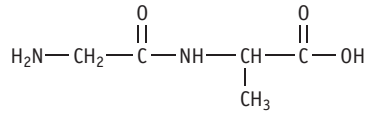
Extraire et exploiter des informations sur la protection d'une fonction dans le cas de la synthèse peptidique pour mettre en évidence le caractère sélectif ou non d'une réaction.

### *Corrigé*

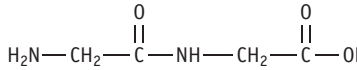
**a.** Dipeptide Ala-Gly :



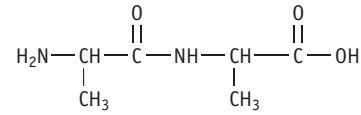
Dipeptide Gly-Ala :



Dipeptide Gly-Gly :



Dipeptide Ala-Ala :



*Remarques :*

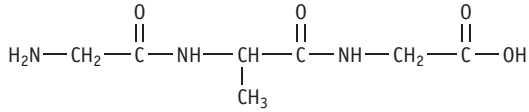
- Les propriétés de Gly-Ala et Ala-Gly sont distinctes : il est important de souligner qu'il ne s'agit absolument pas de la même molécule.
- Les composés formés d'un faible nombre d'acides aminés sont également appelés « oligopeptides ».

• La liaison peptidique est assez rigide, les formes mésomères de cette liaison donnant à liaison C—N un caractère partiel de double liaison.

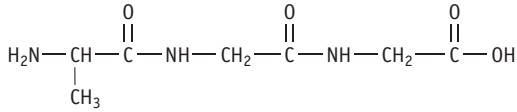
**b.** Il est possible d'ajouter un ou plus des 2 acides aminés de chaque côté de la chaîne aux peptides précédents.

Exemple de tripeptide à partir de Ala-Gly :

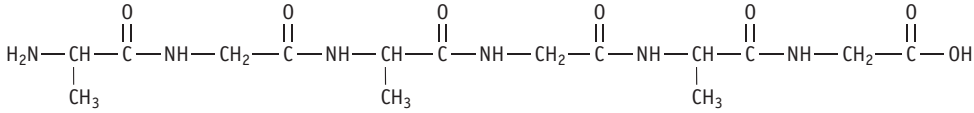
Gly-*Ala-Gly* :



*Ala-Gly*-Ala :

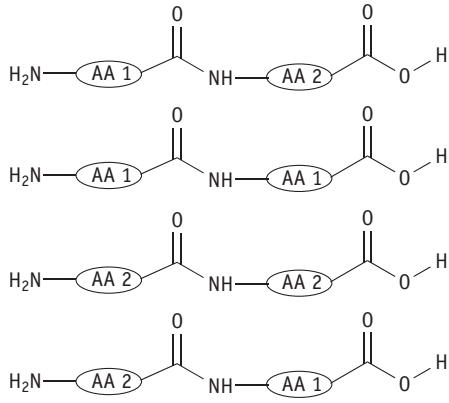


Exemple de polypeptide : Ala-Gly-Ala-Gly-Ala-Gly



**c.** Un grand nombre de produits, composés de 2 ou plus acides aminés, peuvent être obtenus à partir d'un mélange de deux acides aminés. Il n'est donc pas possible de contrôler la nature des acides aminés qui réagissent ensemble (2 alanines, 2 glycines, 1 de chaque), l'ordre de l'enchaînement (la liaison peptidique se fait entre la fonction amine de l'alanine et la fonction acide de la glycine, ou inversement) ni le nombre d'acides aminés incorporés dans la chaîne (obtention de dipeptides, tripeptides…)

**d.** Il suffit de reprendre la question **a**, en employant la représentation schématique :



**e.**

| Étape de protection | Groupe protégé |
|---|---|
| 1 | —COOH, en —$COOGP_1$ |
| 2 | —$NH_2$ en —NH—$GP_2$ |

**f.**

| Étape de déprotection | Groupe déprotégé |
|---|---|
| 4 | —$COOGP_1$ en —COOH |
| 5 | —NH—$GP_2$ en —$NH_2$ |

**g.** Les conditions de déprotection de $GP_1$ et $GP_2$ sont entièrement différentes. En milieu acide il est possible d'enlever $GP_2$ tandis que $GP_1$ reste en place, et l'inverse peut être réalisé en milieu basique. Les réactions de déprotection permettent donc de faire réagir sélectivement un des groupes protecteurs, elles sont donc sélectives.

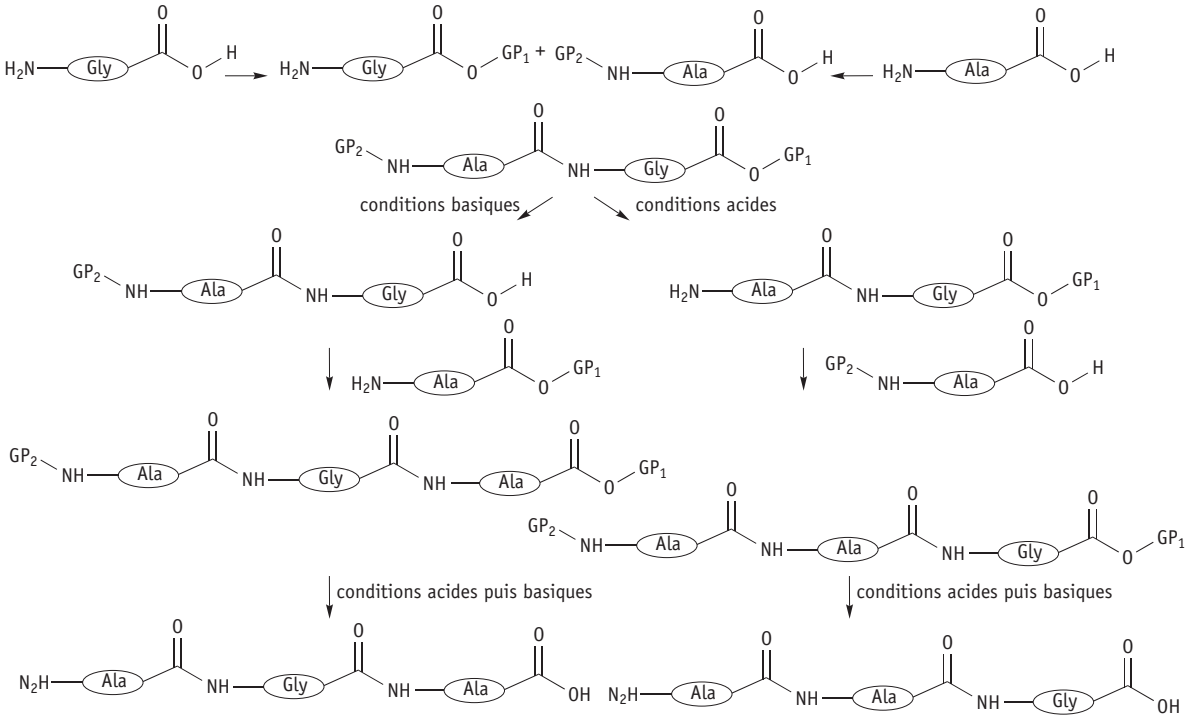
*Remarque :* Les groupes protecteurs $GP_1$ et $GP_2$ sont dits orthogonaux, car ils se déprotègent dans des conditions complètement différentes.

**h.** Tripeptide protégé 1 :

Tripeptide protégé 2 :

**i.** Sous forme non protégé, un acide aminé peut réagir sur lui-même (*cf.* question a). En introduisant AA3 sous forme protégée, il se forme aussi un polymère de AA3 (ce qui complique les étapes de traitement du milieu) ainsi qu'une croissance de chaîne non contrôlée du peptide d'intérêt par incorporation non pas d'un unique acide aminé, mais de plusieurs acides aminés.

**j.**




***Commentaire***

Pour aller plus loin :

• Synthèse de Merrifield avec l'utilisation d'un support solide (une résine) pour faciliter les étapes de traitement du milieu

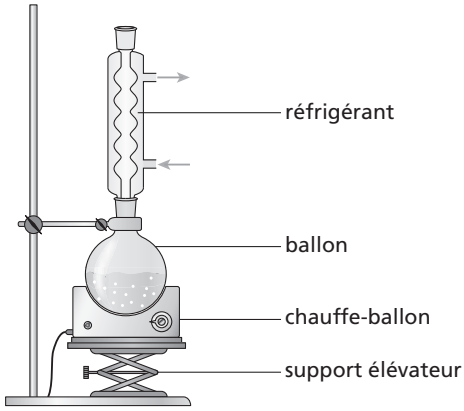
• Un travail de déprotection sélective des fonctions de la chaîne principale d'un peptide sans ôter les groupements protecteurs des chaînes latérales.

# Exercices

## Applications

### 1 Choix d'un montage à reflux

**a.** Montage à reflux :




**b.** L'utilisation d'un montage à reflux permet d'augmenter la température du milieu réactionnel sans perte de matière (espèces volatiles par exemple).

**c.** En employant une température plus élevée, le chimiste joue sur un facteur cinétique et favorise la cinétique de la réaction. Pour un temps de réaction fixé à une heure, le rendement est donc plus grand avec un montage à reflux que sans.

### 2 Utilisation d'une ampoule à décanter

**a.** Le dichlorométhane et l'eau ne sont pas miscibles. Le dichlorométhane est plus dense (1,3) que l'eau, il s'agit donc de la phase inférieure de l'ampoule à décanter. La phase aqueuse est donc au-dessus. Le limonène est soluble dans le dichlorométhane et pas dans l'eau, il se trouve donc dans la phase inférieure, correspondant au dichlorométhane.

**b.** Le limonène est encore moins soluble dans l'eau salée. L'extraction sera donc plus efficace qu'avec de l'eau non salée.

**c.** Le limonène est soluble dans le cyclohexane, qui peut donc être utilisé à la place de dichlorométhane. Dans l'ampoule à décanter la phase aqueuse sera cette fois-ci en dessous de la phase organique, car le cyclohexane ($d = 0{,}78$) est moins dense que l'eau.

### 3 Choix de la purification par colonne de chromatographie

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

## Entraînement

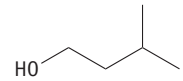
### 4 Réaction de déshydradation

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

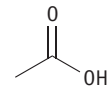
### 5 Analyse de protocole

**1.a.** L'acide sulfurique n'est pas consommé, il s'agit d'un catalyseur.

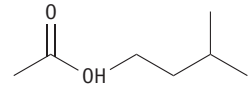
**b.** Le réactif (A) est le 3-méthylbutan-1-ol, c'est-à-dire un alcool :



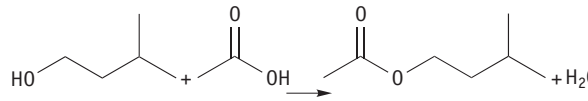

Le réactif (B) est l'acide éthanoïque :




Le produit (C) est l'ester :




**c.** Équation de la réaction :




**2.a.** Pour connaître le réactif limitant, il faut calculer les quantités de matière $n$ mises en jeu :

- acide éthanoïque (B) :

$$n(\text{B}) = \frac{m(\text{B})}{M(\text{B})} = \frac{V(\text{B}) \times d(\text{B}) \times \rho(\text{eau})}{M(\text{B})}$$

avec $V$ le volume en mL, $d$ la densité, $\rho$ la masse volumique et $M$ la masse molaire.

$$n(\text{B}) = \frac{15 \times 1{,}049 \times 1{,}00}{60{,}05} = 0{,}26 \text{ mol}$$

- 3-méthylbutan-1-ol (A) :

$$n(\text{A}) = \frac{m(\text{A})}{M(\text{A})} = \frac{V(\text{A}) \times d(\text{A}) \times \rho(\text{eau})}{M(\text{A})}$$

avec $V$ le volume en mL, $d$ la densité, $\rho$ la masse volumique et $M$ la masse molaire.

$$n(\text{A}) = \frac{8{,}0 \times 0{,}81 \times 1{,}00}{88{,}15} = 7{,}4 \ .10^{-2} \text{mol}$$

Les nombres stœchiométriques sont égaux à 1, le réactif limitant est donc l'alcool A.

**b.** Un rendement ne peut pas être supérieur à 100 %. Alexandre a réalisé le rapport des masses au lieu de prendre le rapport des quantités de matière du produit obtenu $n(C)$ sur la quantité de matière de réactif limitant introduite $n(A)$.

$$R = \frac{n(C)}{n(A)} = \frac{m(C)}{M(C) \times n(A)}$$

$$R = \frac{7,8}{130,19 \times 7,4 \times 10^{-2}} = 0,82 \text{ soit } 82\ \%$$

## Approfondissement

### 6 Synthèse sans solvant d'une chalcone

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

## Exercices de BAC

### 7 Synthèse de l'arôme de vanille

**1.a.** Le chauffage à reflux permet d'augmenter la température d'un milieu réactionnel liquide sans perdre de matières (espèces chimiques volatiles par exemple). En augmentant la température, la durée de la réaction diminue.

**b.** L'anhydride éthanoïque est corrosif, il doit être manipulé sous hotte avec gants et lunettes. De plus il réagit avec l'eau, et donc doit être gardé au sec. Finalement l'anhydride étant inflammable, il faut le tenir éloigner de source de chaleur.

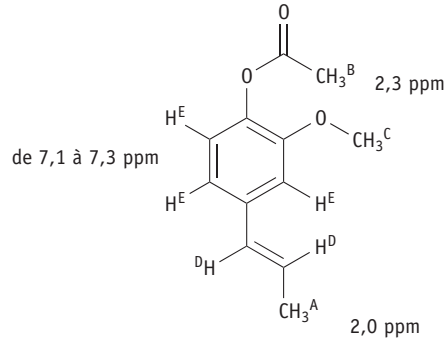
**c.** L'acide phosphorique n'intervient pas dans l'équation de la réaction. La quantité exacte à ajouter n'est pas précisée. L'acide phosphorique est donc un catalyseur de la réaction.

**d.** En versant le contenu du ballon dans de l'eau glacée, des cristaux d'acétate d'isoeugénol sont formés car ce composé n'est pas soluble dans l'eau glacée. Il est alors facile de séparer le produit souhaité du milieu réactionnel par filtration.

**2.a.**

| Déplacement chimique | Intégration | Attribution |
|---|---|---|
| 2,0 ppm | 3H | $H^A$ : —C═C—$CH_3$ |
| 2,3 ppm | 3H | $H^B$ : —$CH_3$—COO— |
| 3,8 ppm | 3H | $H^C$ : Ar—$OCH_3$ |
| 6,1 ppm et 6,4 ppm | 1H et 1H | $H^D$ : Ar—CH═C— et Ar—C═CH— |
| 7,1 à 7,3 ppm | 1 + 2 : 3H | $H^E$ : Ar—H |

Les signaux et les intégrations sur le spectre RMN correspondent à l'acétate disoeugénol. Il y a un signal clairement attribuable à un groupe —$CH_3$ possédant dans son environnement chimique un ester. La réaction a donc bien eu lieu.




**b.** Il est possible de réaliser une CCM, en effectuant un dépôt d'isoeugénol, un dépôt du produit obtenu, et si possible un dépôt d'acétate d'isoeugénol commercial. Il sera alors possible en comparant les tâches la CCM de savoir si le produit obtenu est pur (une seule tâche), s'il s'agit du réactif de départ (tâche à la hauteur de celle du dépôt 1) ou du produit souhaité (tâche à la hauteur du produit commercial).
Il est également possible de mesurer le point de fusion des cristaux obtenus et de vérifier qu'il est de 80 °C.

**3.a.** Un bilan d'atomes montre que la molécule A est l'acide éthanoïque $CH_3COOH$.

**b.** Quantité de matière $n$ :

• d'isoeugénol (I) :

$$n(I) = \frac{m(I)}{M(I)} \text{ ; } n(I) = \frac{10,0}{164} = 6,10.10^{-2} \text{ mol}$$

• d'anhydride éthanoïque (AE) :

$$n(AE) = \frac{m(AE)}{M(AE)} = \frac{V(AE) \times d(AE) \times \rho(eau)}{M(AE)}$$

avec $V$ le volume en mL, $d$ la densité, $\rho$ la masse volumique et $M$ la masse molaire.

$$n(AE) = \frac{20,0 \times 1,08 \times 1,00}{102} = 2,12.10^{-1} \text{ mol}$$

**c.** D'après la question précédente, le réactif limitant est l'isoeugénol.

Quantité de matière de produit obtenu (AI) :

$$n(AI) = \frac{m(AI)}{M(AI)}$$

$$n(AI) = \frac{11,3}{205} = 5,51.10^{-2} \text{ mol}$$

Au final le rendement de la synthèse est donc :

$$R = \frac{n(AI)}{n(I)} = \frac{5,51.10^{-2}}{6,10.10^{-2}} = 0,904$$

Soit $R = 90,4\ \%$

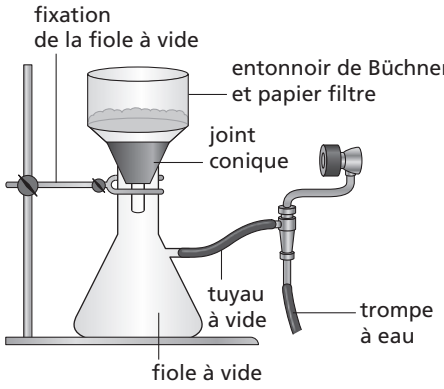
## 8 Synthèse du paracétamol

**I.1.a.** Le montage 1 est un montage à reflux, le 2 un montage de distillation.

**b.** La température de fusion du para-aminophénol est de 187 °C. A température ambiante, il est donc solide.

**c.** La solubilité du paracétamol dans l'eau diminue avec la température, chutant de 25 g pour 100 mL à 100 °C à 1 g pour 100 mL à 20 °C. Le refroidissement du milieu réactionnel entraîne donc la diminution de la solubilité du paracétamol qui peut alors précipiter.

**d.** Montage de filtration sous vide :




**2.a.** Quantité de matière :

• anhydride éthanoïque (AE) :

$$n(\text{AE}) = \frac{m(\text{AE})}{M(\text{AE})} = \frac{V(\text{AE}) \times d(\text{AE}) \times \rho(\text{eau})}{M(\text{AE})}$$

avec $V$ le volume en mL, $d$ la densité, $\rho$ la masse volumique et $M$ la masse molaire.

$$n(\text{AE}) = \frac{12{,}0 \times 1{,}082 \times 1{,}00}{102} = 0{,}127 \text{ mol}$$

• para-aminophénol(PA) :

$$n(\text{PA}) = \frac{m(\text{PA})}{M(\text{PA})}$$

$$n(\text{PA}) = \frac{10{,}0}{109} = 9{,}17.10^{-2} \text{ mol}$$

**b.** Tableau d'avancement en mol

| Réaction | $C_6H_7NO$ + | $C_4H_6O_3$ → | $C_8H_9NO_2$ | $C_2H_4O_2$ |
|---|---|---|---|---|
| État initial | $9{,}17.10^{-2}$ | 0,127 | 0 | 0 |
| État final | $9{,}17.10^{-2} - x_{max}$ | $0{,}127 - x_{max}$ | $x_{max}$ | $x_{max}$ |

*Les quantités de matière et l'avancement sont en moles.*

Le tableau d'avancement montre que le réactif limitant est le para-aminophénol.

**c.** D'après le tableau d'avancement de la question précédente, $n_{th} = n(\text{PA}) = 9{,}17.10^{-2}$ mol

**d.** L'expérimentateur obtient $m_p = 10{,}8$ g de produit, ce qui correspond à une quantité de matière :

$$n_{exp} = \frac{m_p}{M_p}$$

$$n_{exp} = \frac{10{,}8}{151} = 7{,}15.10^{-2} \text{mol}$$

**e.** Calcul du rendement :

$$R = \frac{n_{exp}}{n_{th}}$$

$$R = \frac{7{,}15 \times 10^{-2}}{9{,}17 \times 10^{-2}} = 0{,}78 \text{ soit } 78\%$$

**II.a.** La recristallisation est possible pour purifier le produit, car la solubilité de ce dernier est élevée à haute température et diminue lorsque la température décroît progressivement.

Des cristaux se forment et peuvent être filtrés.

**b.** Dans cette étape, seule la moitié du produit a été employée : $n_{th}' = \frac{n_{th}}{2} = 4{,}59.10^{-2}$ mol

l'expérimentateur obtient $m_{p2} = 4{,}20$ g de produit, ce qui correspond à une quantité de matière :

$$n'_{exp} = \frac{m_p}{M_p}$$

$$n'_{exp} = \frac{4{,}20}{151} = 2{,}78.10^{-2} \text{ mol}$$

Calcul du rendement :

$$R' = \frac{n'_{exp}}{n'_{th}}$$

$$R' = \frac{2{,}78.10^{-2}}{4{,}59.10^{-2}} = 0{,}607 \text{ soit environ } 61\%$$

**c.** $R'$, le rendement après recristallisation, est plus petit que $R$.

**d.** La vraie valeur du rendement est celle de $R'$, car le premier rendement $R$ prenait en compte les impuretés présentes dans le produit brut. Il faut toujours calculer un rendement sur un produit pur

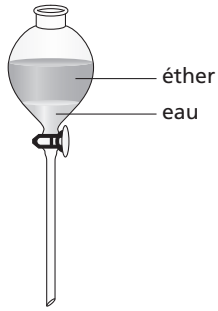
**III.a.** Les 2 tâches pour le dépôt du paracétamol brut montrent que le produit n'est pas pur. Il contient bien du paracétamol (tâche à la hauteur de celle de $P_3$), mais contient également une autre impureté, qui n'est pas le para-aminophénol. L'unique tâche à hauteur du dépôt P3 dans le cas du paracétamol recristallisé montre qu'il s'agit de paracétamol pur.

**b.** Le paracétamol obtenu après recristallisation est pur, comme l'indique l'unique tâche associée à ce dépôt, ce qui permet de vérifier la valeur du rendement annoncée en **II.d.**

## 9 Séparation d'un mélange

**1.a.** Il faut manipuler sous hotte, certains composés étant nocifs par inhalation, et avec des gants et lunettes de protection pour que la peau et les yeux ne soient pas irrités par le contact avec les composés.

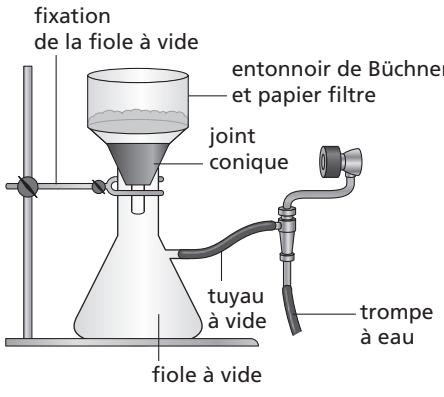
**b.** L'éther et l'eau ne sont pas miscibles, il y a deux phases dans l'ampoule à décanter. L'éther étant moins dense que l'eau (0,7), il se trouvera dans la phase supérieure.




**c.** La phase aqueuse est basique (de la potasse a été introduite), l'acide benzoïque se trouve donc dans cette phase aqueuse sous forme d'ions benzoate. L'alcool benzylique est soluble dans l'éther, il se trouve donc dans la phase supérieure.

**2.a.** En acidifiant la phase aqueuse, le chimiste diminue nettement la solubilité de l'acide benzoïque dans l'eau (la molécule qui était chargée devient neutre), ce composé peut alors précipiter.

**b.**




**c.** La température du point de fusion du composé correspond à celle de l'acide benzoïque. Le composé obtenu est donc bien celui attendu et est pur. Un spectre RMN permettrait également de caractériser la nature et la pureté du produit. En réalisant un CCM dans des bonnes conditions, il est également possible d'avoir des informations sur la nature et la pureté du produit, surtout si l'on possède des échantillons de référence.

**d.** Calcul de quantité de matière :

• pour l'acide benzoïque (ab) :

$$n_{exp} = \frac{m(ab)}{M(ab)}$$

$$n_{exp} = \frac{1,0}{122,12} = 8,2.10^{-3} \text{ mol}$$

• pour le benzaldéhyde (b), qui est le réactif limitant, car la potasse est ajoutée en excès :

$$n_{th} = \frac{m(b)}{M(b)} = \frac{V(b) \times d(b) \times \rho(eau)}{M(b)}$$

avec $V$ le volume en mL, $d$ la densité, $\rho$ la masse volumique et $M$ la masse molaire

$$n_{th} = \frac{2,0 \times 1,04 \times 1,00}{106,13} = 0,020 \text{ mol}$$

le rendement est donc :

$$R = \frac{n_{exp}}{n_{th}}$$

$$R = \frac{8,2.10^{-3}}{0,020} = 0,42 \text{ soit } 42\ \%$$

**3.a.** Le sulfate de sodium anhydre enlève les traces d'eau présentes dans la phase organique.

**b.**

• Préparer le mélange de solvant servant de phase mobile (appelé éluant) en respectant les proportions du mode opératoire.

• Placer un demi-centimètre d'éluant dans la cuve à chromatographie.

• Tapisser la moitié de la surface latérale de la cuve avec un papier filtre.

Fermer la cuve.

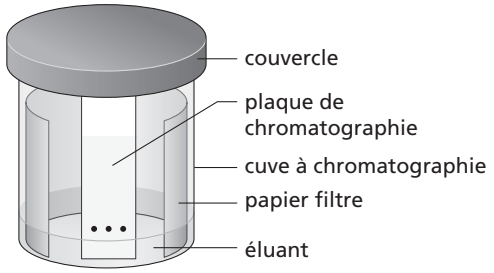
• Sur une plaque de chromatographie, tracer un trait au crayon à 1 cm du bas.

• Déposer sur le trait à l'aide de capillaires les échantillons à étudier et les produits de référence. Les espacer d'au moins 1 cm.

• Placer la plaque dans la cuve en vérifiant que les dépôts ne trempent pas dans l'éluant. Laisser éluer jusqu'à ce que le front de l'éluant soit à 1 cm du haut de la plaque.

• Retirer la plaque de la cuve et marquer aussitôt au crayon le niveau atteint par l'éluant.

• Si les taches ne sont pas visibles, les révéler (aux ultraviolets ou en trempant la plaque dans une solution de diiode ou de permanganate de potassium).




**c.** Les 2 tâches présentes pour le dépôt B indiquent que le produit obtenu n'est pas pur. Si de l'alcool benzylique a été produit (tâche à la hauteur de celle du dépôt A), il reste un autre composé en solution (il pourrait s'agir du benzaldéhyde, une CCM avec un dépôt complémentaire pourrait apporter cette information).

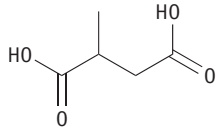
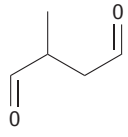
**d.** Le produit n'est pas pur, il n'est donc pas possible de calculer un rendement. Une partie de la masse pesée est en effet due à des impuretés et non au produit désiré.

**e.** Les deux tâches du dépôt B sont bien séparées, il est donc envisageable de réaliser une chromatographie sur colonne pour purifier ce produit.

### 10 Oxydation sélective

**a.** Le composé A comporte une fonction alcool primaire et une fonction aldéhyde. Le composé A est donc polyfonctionel.

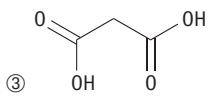
**b.** Les deux fonctions sont susceptibles de subir une oxydation. Les produits obtenus sont donc :

| Oxydant utilisé | Réactif de Jones | Réactif de Sarett |
|---|---|---|
| Produit obtenu |  |  |

**c.** Le réactif de Sarett permet de transformer uniquement le groupe hydroxyde, il est donc chimiosélectif. Ce n'est pas le cas du réactif de Jones qui transforme la fonction aldéhyde et alcool en même temps.

**d.** ① Seule la fonction alcool doit être oxydée : il faut utiliser le réactif de Sarett

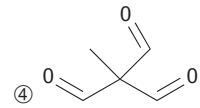
② Les deux fonctions oxydables doivent être oxydées : il faut utiliser le réactif de Jones



③

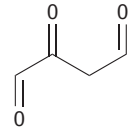


④

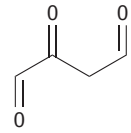


**e.** Le réactif de Dess-Martin permet de transformer uniquement l'alcool en aldéhyde, sans transfromer l'autre fonction oxydable : il s'agit donc d'un réactif chimiosélectif.

**f.** ① même produit

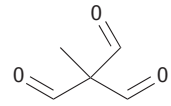


② le produit obtenu en 1



③

④ le même produit



## Rédiger une synthèse de documents

### 11 Synthèse de l'aspartame

*Analyse de la question*

La synthèse doit faire apparaître une partie sur la protection, une sur la déprotection et une dernière sur la voie enzymatique.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1. Protection**

Trois idées doivent apparaître dans la réponse de l'élève :

**a.** nécessité de la protection : contrôle de l'enchaînement

**b.** cas de la phénylalanine : la fonction alcool est protégée en ester.

**c.** cas de l'acide aspartique : la fonction amine est protégée en HNCBz et la fonction supplémentaire alcool est protégée en COOBn.

**2. Réaction et déprotection**

Les deux idées qui doivent apparaître dans la synthèse sont :

**a.** réaction : formation de la liaison peptidique.

**b.** déprotection : de l'amine et de l'acide carboxylique de l'acide aspartique.

**3. Voie enzymatique**

La voie enzymatique, réalisée *in vivo* ou *in vitro*, doit être décrite en mettant en valeur trois idées :

**a.** pas de protection nécessaire.

**b.** condition plus douces.

**c.** grandes économies pour des procédés réalisés sur des échelles industrielles.

# Chapitre 21 Signaux analogiques et numériques

## Introduction au chapitre (p. 522)

Ce chapitre est une ouverture sur les applications modernes de la physique. Il permet d'expliquer le principe de fonctionnement de certains appareils sans rentrer dans les détails technologiques.

Le début du chapitre est consacré à définir ce que sont les signaux analogiques et numériques. La suite aborde la conversion des signaux analogiques en signaux numériques avec l'étude de l'échantillonnage-blocage, de la quantification et de la numérisation.

La troisième partie traite de l'image numérique, de sa conversion et du codage des couleurs en RVB. Le cours de ce chapitre se termine par le principe de stockage et de la lecture des disques optiques. Cette partie est en lien avec le chapitre 4 sur les propriétés des ondes avec les phénomènes de diffraction et d'interférences.

La première activité sert à repérer un signal analogique et un signal numérique. Une activité expérimentale utilisant l'échantillonneur-bloqueur et le convertisseur analogique-numérique d'une interface ExAO illustre le principe de cette conversion et ses limites.

Une activité sur l'image numérique permet de comprendre comment est pixelisée une image à partir d'un caractère manuscrit. Dans cette activité, le codage des couleurs en RVB est abordé. La réalisation et l'analyse d'une image représentant un phénomène de diffraction sont traitées dans l'activité expérimentale de cette partie.

Enfin, une activité sur le disque optique termine cette série des activités.

Les exercices balayent tous les domaines du cours en prenant des exemples dans la vie courante.

Dans ce chapitre, nous avons pris le parti de se détacher le plus possible de l'écriture binaire puisqu'elle n'est clairement pas au programme. Néanmoins la notion de bit et d'octet est nécessaire sans que cela déborde de manière trop importante sur le cours.

## Activités

### 1 Analogique ou numérique ? (p. 524)

***Objectif***

L'objectif de cette activité est de pouvoir reconnaître un signal analogique ou numérique à partir de différents modes de communications. Pour un signal numérique, il est important de rappeler qu'il ne faut pas confondre l'information elle-même, qui est codée sous forme de nombres, et la grandeur physique qui véhicule le signal, qui est toujours une fonction continue du temps.

***Correspondance avec le programme***

Reconnaître des signaux de nature analogique et des signaux de nature numérique.

***Corrigé***

**a. Figure 1 :** il s'agit d'un signal numérique puisque la tension électrique transporte un nombre sous la forme d'impulsion courte ou longue.

**Figure 2 :** il s'agit d'un signal analogique car le son est transmis par la vibration de la corde, il est composé d'une multitude de niveaux de vibrations.

**Figure 3 :** les panaches de fumée correspondent à un message numérique, chaque panache de fumée ayant une signification. Le message est transporté par la lumière.

**Figure 4 :** le signal Wi-Fi est numérique puisqu'il s'agit d'une succession de nombre binaire.

**Figure 5 :** les signaux reçus par la radio sont analogiques car le signal possède une infinité de niveau de tension.

**b. Figure 1 :** le support de l'information est un phénomène électromagnétique. Il s'agit d'une onde électrique transportée par le câble.

**Figure 2 :** le support de l'information est un phénomène mécanique, car les vibrations sonores se déplacent le long de la corde par vibration mécanique de la corde.

**Figure 3 :** le support de l'information est un phénomène électromagnétique, car c'est la lumière parvenant aux yeux de l'observateur qui transporte le message.

**Figure 4 :** l'onde Wi-Fi est une onde radio, elle est donc électromagnétique.

**Figure 5 :** les signaux reçus par les radios sont des ondes électromagnétiques.

**c.** Les supports des **figures 1** et **2** nécessitent l'installation d'un câble de transmission afin de guider les ondes tandis que dans les supports des **figures 3**, **4** et **5** les ondes n'ont pas besoin de support pour guider la propagation des ondes.

**d. Figure 1 :** suite de signes.
**Figure 2 :** son.
**Figure 3 :** suite de signes.
**Figure 4 :** suite de signes.
**Figure 5 :** son.

## 2 Tableau de nombres et images numériques (p. 525)

### *Objectif*

Cette activité se compose de deux parties.

La première partie traite de la numérisation d'une image simple en noir et blanc avec détermination de tableau de nombre. Une application d'affichage sur une calculatrice permet d'illustrer cette partie.

La seconde partie aborde le codage couleur de type RVB : une application simple avec l'utilisation de quelques lignes de texte permet de travailler avec un simple navigateur de type Firefox ou Explorer.

Cette activité peut aussi se traiter en utilisant un générateur de couleur RVB.

### *Correspondance avec le programme*

• Images numériques. Caractéristiques d'une image numérique : pixellisation, codage RVB et niveaux de gris.

• Associer un tableau de nombres à une image numérique.

### *Corrigé*

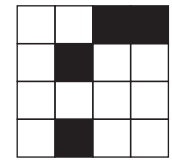
*Remarque :* Pour des raisons de simplification, la valeur portée par le pixel est 0 ou 1 ce qui correspond respectivement au noir et blanc.

**a.** L'étape qui consiste à fixer un seuil de détection et de comparer l'occupation en blanc du pixel est appelée quantification. Avec l'aide de ce seuil une valeur numérique est renvoyée.

Pour un seuil de 50 % le tableau de nombres est :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |

La reconstruction de l'image d'après la numérisation précédente donne la figure ci-contre.



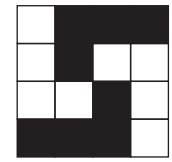
La reconstruction ne permet pas de reconnaître le « S », elle n'est donc pas satisfaisante.

**b.** En augmentant le seuil de détection de blanc à 75 % cela permet de fixer le seuil de noir à 25 %.

Pour un seuil de 75 % le tableau de nombres est :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 |

La reconstruction de l'image d'après la numérisation précédente donne la figure ci-contre.

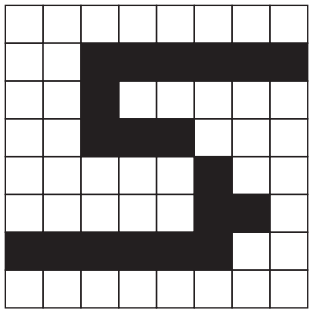


La numérisation est meilleure mais pas parfaite.

**c.** Le tableau de nombres obtenu est le suivant :

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

La reproduction donne la figure suivante :



La qualité de la reproduction est meilleure car la résolution a augmenté. La résolution consiste à augmenter le nombre de pixels.

**d.** Le seuil de détection permet d'améliorer la quantification. Le nombre de pixels permet d'augmenter la qualité de la reproduction.

**e.** Ouvrir une fenêtre programme n'est pas obligatoire, mais cela permet de pouvoir réutiliser les différentes fonctions pxlon.

**• Protocole avec une calculatrice CASIO :**

Afin de visualiser correctement la figure, il faut enlever les axes, grilles, coordonnées.

Dans Setup mettre off toutes ces représentations. Ceci peut être ajouté au programme.

Dans le menu prendre PRGM puis choisir New pour nouveau programme et donner un nom.

Pour la fonction pxlOn, il faut faire SHIFT SKETCH puis PIXL ON

PxlOn 27,26
PxlOn 30,26
PxlOn 26,29
PxlOn 31,29
PxlOn 27,31
PxlOn 28,30
PxlOn 29,30
PxlOn 30,30

**• Protocole avec une calculatrice Texas instruments :**

Il faut enlever ce qui peut gêner l'affichage des pixels. Dans *FORMAT* mettre *GridOff*, *AxesOff* et *CoordOff*.

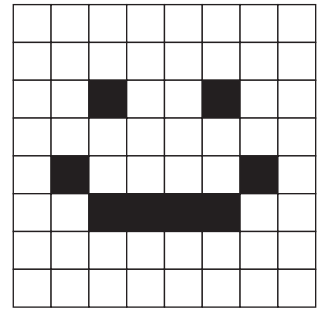
Utiliser la touche *PRGM* puis *NEW* (Nouveau) puis nommer le programme.

Sous l'éditeur *DRAW* puis *POINTS* et enfin la fonction *Pxl-ON*().

À noter que l'emplacement des lignes et des colonnes sont inversés par rapport à la CASIO.

Pxl-On (26, 27)
Pxl-On (26, 30)
Pxl-On (29, 26)
Pxl-On (29, 31)
Pxl-On (30, 27)
Pxl-On (30, 28)
Pxl-On (26, 29)
Pxl-On (30, 30)

La figure tracée est un smiley.



**f.** Le codage RVB = (0, 0, 0) correspond au noir.
Le codage RVB = (255, 255, 255) correspond à du blanc.
Le codage RVB = (0, 0 à 255, 0) correspond à du vert plus ou moins foncé.
Le codage RVB = (0 à 255, 0, 0) correspond à du rouge plus ou moins foncé.
Le codage RVB = (0, 0, 0 à 255) correspond à du bleu plus ou moins foncé.

Afin d'obtenir différents niveaux de gris plus ou moins foncés, il faut fixer la même valeur numérique pour les trois couleurs RVB, ce qui fait 255 niveaux de gris.

Pour le jaune : RVB = (255, 255, 0).

Pour le magenta : RVB = (255, 0, 255).

Pour le cyan : RVB = (0, 255, 255).

**g.** Le codage tangerine donne en RVB = (255, 127, 0).
Il s'agit d'une couleur orange.

## 3 Stockage de l'information sur un disque optique (p. 526)

### *Objectif*

Cette activité comporte deux parties : la première a pour objectif de comprendre la structure d'un CD et par extension la structure d'un DVD et d'un Blu-ray.

La seconde permet de lier la capacité de stockage d'un disque optique au phénomène de diffraction qui engendre le spot laser frappant le disque.

L'étude des différentes technologies montre que deux grandeurs physiques permettent de diminuer la taille du spot laser frappant le disque.

Les grandeurs physiques mises en évidences sont : la longueur d'onde du laser et le choix de la lentille focalisant le faisceau laser.

### *Correspondance avec le programme*

• Stockage optique. Écriture et lecture des données sur un disque optique. Capacités de stockage.

• Relier la capacité de stockage et son évolution au phénomène de diffraction.

### *Corrigé*

**a.** C'est un stockage optique car la lecture et l'écriture des données s'effectuent par un laser qui utilise les propriétés de réflexion de la couche métallique du CD.

La lecture d'un creux engendre un phénomène d'interférence destructive, qui est une propriété ondulatoire de la lumière.

Ce support est normalement durable car il n'y a pas de contact mécanique.

Il n'y a donc pas d'usure due aux frottements mécaniques.

**b.** Soit $L = 5{,}77$ km la longueur de la piste et $d = 0{,}84$ µm la taille minimum d'un ceux ou plat.

$L = N\,d$ où $N$ est nombre de creux ou de plats.

Il y a $N = \dfrac{5{,}77.10^{3}}{0{,}84.10^{-6}} = 6{,}9.10^{9}$ creux ou plats.

**c.** Si un creux ou plat représente un bit, en octet cela donne :

$N = \dfrac{6{,}9.10^{9}}{8} = 8{,}6.10^{9}$ octets car 8 bits = 1 octet.

**d.** La capacité de stockage perdue est de :

860 – 680 = 180 Mo.

Le codage diminue la capacité de stockage.

*Remarque :* un exemple de ce type de codage est représenté sur la **figure 18** p. 534 du manuel de l'élève.

**e.** Le diamètre du spot impose une taille minimum au creux et au plat.

En effet, si la tache est trop grande celle-ci risque de recouvrir plusieurs creux et plat à la fois.

L'information n'est pas clairement lue.

D'après le tableau la diminution du diamètre du spot permet ainsi d'améliorer la capacité de stockage, ce qui est le cas entre le CD et Blu-ray.

**f.** La relation de l'ouverture angulaire s'écrit :

$\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ où $\lambda$ est la longueur d'onde de la source et $a$ la taille de l'obstacle rencontré par le faisceau.

La longueur d'onde du laser est représentée par $\lambda$ dans l'expression.

Plus la longueur d'onde est petite plus l'angle d'ouverture est petit, ainsi plus le spot frappant le disque est petit.

**g.** Voir la **figure 21** p. 531 du manuel de l'élève.

Le schéma montre que plus la lentille est convergente, plus la distance focale, distance entre la lentille et la couche de lecture, est petite.

Par exemple, la couche de lecture se retrouve sur la surface du disque pour un disque Blu-ray.

**h.** Deux paramètres permettent de diminuer le diamètre du spot : la longueur d'onde de la diode laser et la convergence de la lentille servant à produire ce spot.

L'exemple du HD-DVD qui possède une diode laser identique à celle d'un lecteur Blu-ray montre que la capacité d'un disque optique ne dépend pas uniquement de la longueur d'onde du laser mais aussi de sa lentille.

Les technologies qui sont citées dans le tableau montrent une augmentation de la capacité de stockage qu'en fonction de la diminution de la longueur d'onde.

Ce qui n'est pas le cas en réalité.

### *Commentaires*

Les CD pressés ont une durée de vie comprise entre 30 et 100 ans.

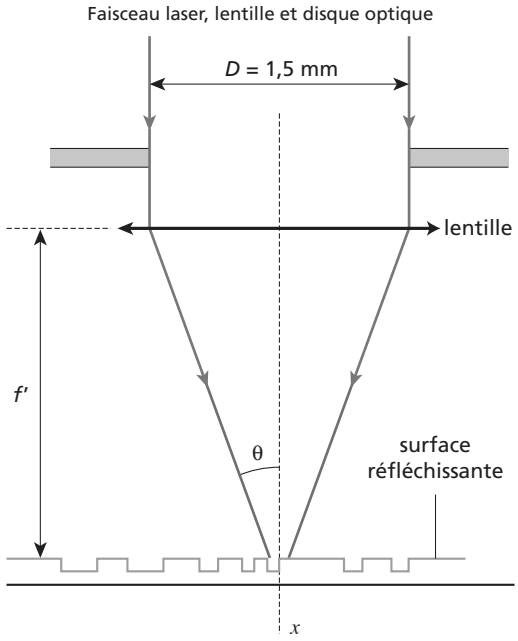
Les CD gravés ont une durée de vie plus limitée entre 5 et 10 ans car la structure brûlée de ces disques vieillit mal.

Le diamètre du spot détermine la taille des cuvettes.

Ce diamètre dépend de la relation suivante :

$$d = 1{,}22\frac{\lambda}{\mathrm{NA}}$$

issue de la diffraction à travers un orifice circulaire, où $\lambda$ est la longueur d'onde du laser et NA est l'**ouverture numérique** du dispositif. Elle est définie par : $\mathrm{NA} = \sin\theta = \dfrac{\dfrac{D}{2}}{\sqrt{\left(\dfrac{D}{2}\right)^{2} + f'^{2}}}$.




Il existe deux façons de diminuer le diamètre $d$ du spot laser.

Soit la longueur d'onde est diminuée et cela n'a aucune influence sur $f'$ et donc sur la position de la couche de données sur le disque optique. En effet, la position de la couche de données est identique pour un DVD et HD-DVD qui ont des longueurs d'ondes respectives de 650 nm et 405 nm.

La seconde méthode consiste à augmenter l'ouverture numérique NA.

Or : $$NA = \frac{\frac{D}{2}}{\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + f'^2}}$$

donc si NA augmente $f'$ doit diminuer ce qui implique que la lentille doit se rapprocher de la couche de lecture.

Ainsi la couche des données d'un disque Blu-ray est très proche de la surface du disque à 0,1 mm (contre 0,6 mm pour le DVD).

Cela n'est pas sans conséquence puisque les données sont moins protégées par la couche polycarbonate.

Le développement par TDK d'un matériau transparent plus résistant que les polycarbonates classiques a permis cette protection.

## 4 Étude d'un phénomène optique à l'aide d'un capteur (p. 527)

### *Objectif*

L'activité expérimentale donne l'occasion de faire le lien entre le chapitre 21 sur l'image et le chapitre 4 sur les propriétés des ondes. Elle nécessite un matériel informatique pour le traitement de l'image, un appareil photo ou webcam de qualité, ainsi qu'un montage optique classique.

### *Liste de matériel par binôme*

- Un ordinateur sur lequel est installé le logiciel *ImageJ*
- Un laser.
- Une fente calibrée.
- Une feuille de papier ou verre dépoli.
- Un support pour fixer la feuille de papier ou le verre dépoli.
- Des filtres polarisants.
- Un appareil photo ou une webcam de qualité.

### *Correspondance avec le programme*

- Images numériques.
- Caractéristiques d'une image numérique : pixellisation, codage RVB et niveaux de gris.
- Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un capteur (caméra ou appareil photo numériques par exemple) pour étudier un phénomène optique.

### *Corrigé*

**a.** Les premières extinctions sont placées sur le graphe pour des valeurs nulles de l'intensité lumineuse. En utilisant le curseur, la valeur mesurée est de 3,11 cm. En utilisant une méthode directe, on est confronté à un problème d'adaptation de la vision donc la mesure. Il faut mesurer l'extinction au milieu de l'espace noir séparant la tache centrale des taches secondaires.

La valeur mesurée est $L = 3{,}0 \pm 0{,}1$ cm.

**b.** La distance mesurée est $D = 3{,}00 \pm 0{,}005$ m et la fente utilisée a une épaisseur de : $a = 0{,}12 \pm 0{,}005$ mm. Ainsi :

$$\lambda = \frac{0{,}12.10^{-3} \times 3{,}11.10^{-2}}{2 \times 3{,}00} = 6{,}2.10^{-7}\text{m} = 6{,}2.10^{1}\text{nm}$$

Ce qui donne un écart relatif :

$$\varepsilon_{\%} = \left| \frac{632{,}8 - 6{,}2.10^{1}}{632{,}8} \right| = 2{,}0\ \%.$$

La valeur obtenue est proche de celle indiquée sur le laser.

**c.** L'incertitude de la mesure de $L$ est de 2 pixels, or un pixel représente 6,46 $10^{-3}$ cm donc 2 pixels donnent $2 \times 6{,}46\ 10^{-3} = 1{,}29.10^{-2}$ cm.

La mesure de $L$ donne $L = 3{,}11 \pm 0{,}01$ cm.

L'incertitude relative est :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta D}{D} \text{ donc :}$$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{0{,}01.10^{-6}}{0{,}12.10^{-6}} + \frac{1.10^{-4}}{3{,}11.10^{-2}} + \frac{1.10^{-2}}{3{,}00} = 9{,}1\ \%.$$

À noter que cette valeur d'incertitude relative est élevée, mais ce n'est pas la méthode qui est en cause car le rapport de $\frac{\Delta L}{L} = 0{,}41$ % est faible tandis qu'il aurait été plus élevé par une méthode directe utilisant la règle $\frac{\Delta L}{L} = \frac{0{,}1}{3{,}1} = 3{,}2$ %.

Le problème vient de l'incertitude de la mesure de la fente.

### *Commentaires*

**• Traitement de l'image**

Le logiciel utilisé dans cette correction est *imageJ*. Il est écrit en Java ce qui signifie qu'il existe pour les différentes plateformes logiciels (Windows, mac OSX, linux).

*Régavi* est un autre logiciel permettant l'analyse de l'intensité lumineuse en fonction de la couleur du pixel mais ce logiciel impose l'utilisation de regressi.

Mode d'emploi pour obtenir la courbe de l'intensité en fonction de la position sur l'écran.

Dans *File* → *Open* → *Charger le fichier* correspondant à votre photo.

Placer la ligne à analyser avec le bouton ligne, puis dans *Analyse* → *Plot profile*.

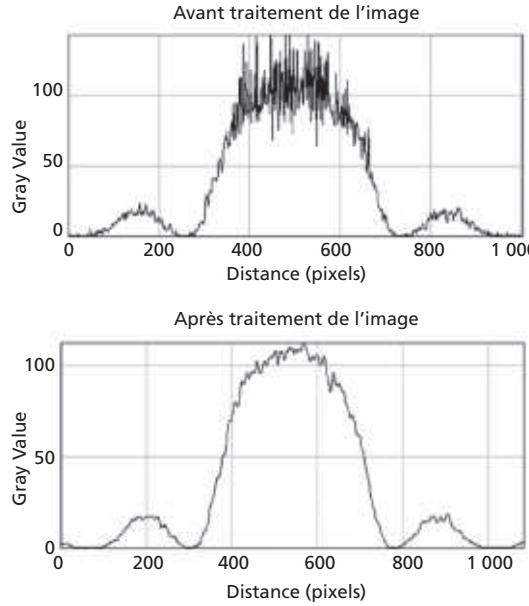
Le graphe de l'intensité en fonction du numéro de pixel s'affiche.

La copie du fichier est possible en cliquant sur *Copier* et le transfert dans un tableur grapheur s'effectue par *Coller*.

**• Amélioration de la photo**

*ImageJ* regorge de fonctions permettant de retravailler l'image. Une fonction intéressante est la fonction filtre qui permet d'enlever le bruit.

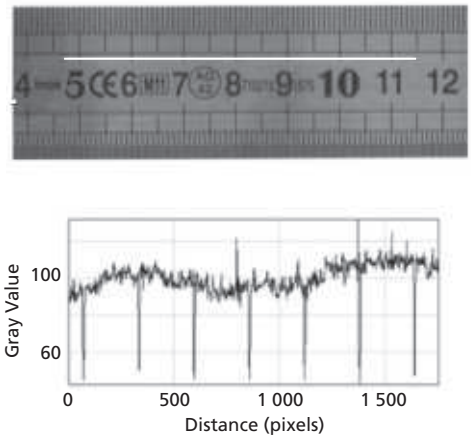
Le meilleur est le filtre « Gaussian Blur » avec un sigma compris entre 2 et 4. Cette fonction agit comme un filtre passe-bas.




**• Méthode de détermination d'une échelle**

La photo du phénomène donne une échelle en pixel, il faut donc lier les centimètres aux pixels. Une photo d'un étalon est prise dans les mêmes conditions : même position de l'appareil et même réglage que pour la photo du phénomène optique.

Le trait jaune sur la photo montre la ligne analysée par le logiciel. Cette ligne est placée ainsi car elle permet de marquer les centimètres. Ils sont noirs et vont donc correspondre à des pics inverses sur le graphe. À l'aide du curseur du graphe, on détermine la distance de 6 cm en pixel.



L'étalon doit être reproduit avec des traits noirs de façon à pouvoir le repérer les distances lors du traitement de l'image.

Dans l'exemple précédent, on trouve :

1 645 − 70 = 1 575 px pour 6,0 cm.

Donc 1 575 px valent 6,0 cm soit :

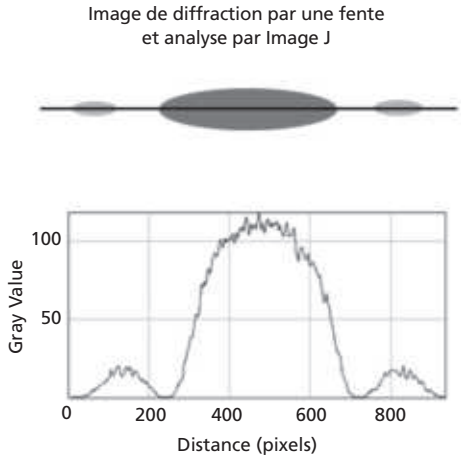
$1\text{px} = \dfrac{6{,}0}{1\ 575} = 3{,}8.10^{-3}$ cm = 38 mm.

Cette valeur est utile pour le changement d'échelle dans le tableur grapheur.

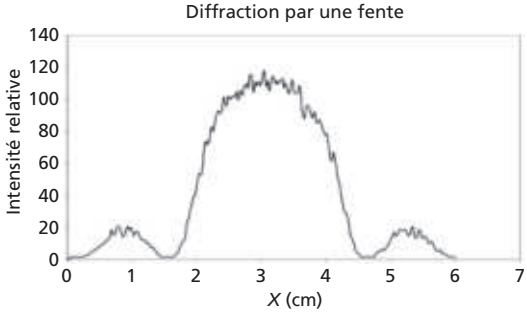
Le changement d'échelle peut s'effectuer directement dans *imageJ*.

**• Exemple de mesures**

Le résultat obtenu doit ressembler cela.




Le graphe suivant est obtenu avec un tableur-grapheur avec une échelle de $6{,}5.10^{-3}$ cm/px.




**• Informations techniques**

Il est possible d'utiliser une webcam performante pour effectuer cette photo, l'avantage est que ça permet le réglage en direct.

Les mesures présentées dans cette partie ont été réalisées avec des diapositives Leybold ref : 469 91.

Les fentes doivent être de bonne qualité pour obtenir une extinction nette.

Les photos sont prises sur un écran transparent légèrement opaque, une simple feuille de papier blanche suffit, si vous disposez d'un verre dépoli c'est mieux.

Il faut bien contrôler l'intensité lumineuse car le capteur peut saturer.

Le temps de pause ne doit pas être trop long afin d'éviter la dérive thermique des capteurs CCD sauf si l'appareil est prévu pour compenser ce problème.

## 5 Étude d'une interface d'ExAO (p. 528)

### *Objectif*

Cette activité étudie un ensemble convertisseur analogique-numérique et échantillonneur d'une interface ExAO. Elle permet de mettre en évidence les problèmes posés par une mesure effectuée avec ce type d'appareil : échantillonnage, plage d'entrée, pas de conversion.

Cette activité expérimentale a été testée sur deux types d'interfaces ExAO :

• loggerpro avec et le logiciel Labpro,

• centrale d'acquisition SYSAM-SP5 d'Eurosmart et le logiciel Latis Pro.

Les deux interfaces possèdent une résolution de 12 bits. Cette activité est néanmoins transposable à tous les types d'interfaces.

### *Liste de matériel (par binôme)*

• Une interface d'ExAO.

• Documentation de l'interface.

• Un GBF (générateur basse fréquence).

• Un microphone.

• Un ordinateur.

• Un diapason ou une source à 440 Hz.

### *Correspondance avec le programme*

Conversion d'un signal analogique en signal numérique. Échantillonnage ; quantification ; numérisation.

Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un échantillonneur-bloqueur et/ou un convertisseur analogique numérique (CAN) pour étudier l'influence des différents paramètres sur la numérisation d'un signal (d'origine sonore, par exemple).

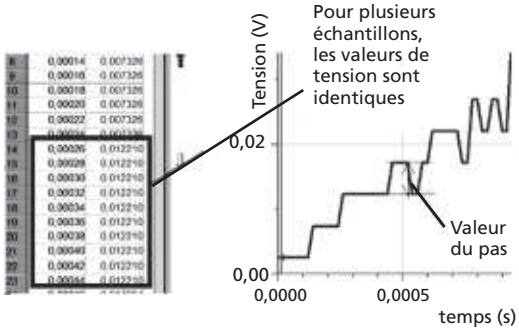
***Corrigé***

**a.** La tension d'entrée de l'interface ne dépasse pas les – 10V dans les négatifs et + 10V dans les positifs. Ceci donne un écart de tension d'entrée de 20V.

La plage d'entrée en tension est comprise entre – 10V et + 10V.

La variation lente du signal triangulaire et le choix d'un échantillonnage important permettent de mettre en évidence tous les niveaux quantification du convertisseur. La plus petite variation observée correspond au pas (ou quantum) de conversion.

Il suffit pour la déterminer d'observer les variations dans le tableau de valeurs ou de faire un zoom important sur le graphe.




En prenant des valeurs du tableau, cela donne par exemple : 0,017 094 – 0,012 210 = 4,884 mV, pour les valeurs précédentes :

0,012 210 – 0,00732 = 4,884 mV.

**b.** Pour déterminer le pas de conversion, il faut effectuer le calcul suivant :

$p = \dfrac{\Delta U}{2^n}$ où $\Delta U$ est l'amplitude de la plage des tensions d'entrées. Le nombre $n$ correspond au nombre de bit du convertisseur. Cette information est donnée dans la documentation du constructeur.

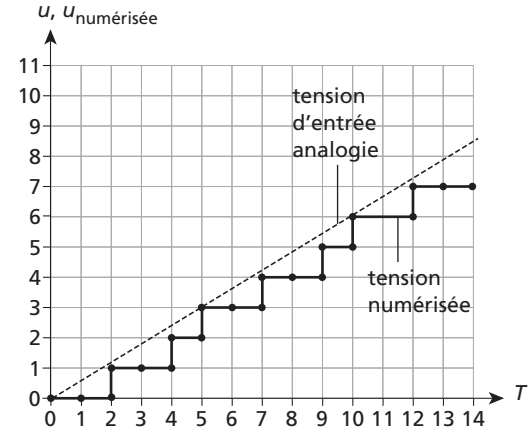
Dans notre cas, il s'agit d'une interface 12 bits. Ainsi $p = \dfrac{20{,}00}{2^{12}} = 4{,}883$ mV.

*Remarque :* on peut placer au moins deux décimales pour la tension car les CAN ont des régulateurs de tension très performants.

**c.** Plusieurs échantillons ont des valeurs de tensions identiques. La tension d'entrée varie très lentement et le niveau suivant de quantification n'est pas atteint lorsque l'échantillon suivant arrive.

Il y a un échantillonnage trop important.

La représentation reconstruite risque de présenter des zones constantes.




Échantillonnage : toutes les ms.

Pas de quantification : 1 V

Tension numérisée : arrondie au pas de quantification inférieur du pas.

**d.** Le montage utilisé est un montage « classique » d'acquisition d'un son par l'intermédiaire d'une interface.

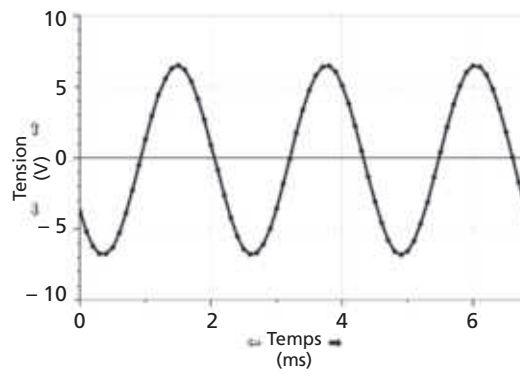
L'intérêt de cette manipulation n'est pas de traiter le son mais d'utiliser le signal sonore pour évaluer les problèmes rencontrés lors d'une conversion analogique-numérique avec échantillonnage d'un signal.

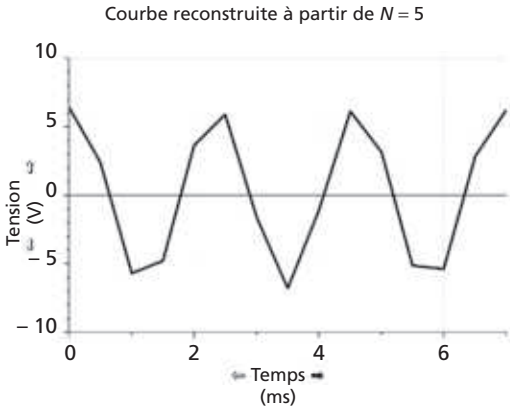
Le microphone peut très bien être remplacé par un GBF pour simuler le son.

**e.** Quelques valeurs afin de régler l'échantillonnage.

| $f_e$ (Hz) | 110 | 220 | 440 | 880 | 2 200 | 4 400 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $T_e$ (ms) | 9,09 | 4,55 | 2,27 | 1,14 | 0,454 | 0,227 |
| $N = \dfrac{T}{T_e} = \dfrac{f_e}{f}$ | 0,25 | 0,5 | 1 | 2 | 5 | 10 |

Courbe reconstruite à partir de $N = 10$



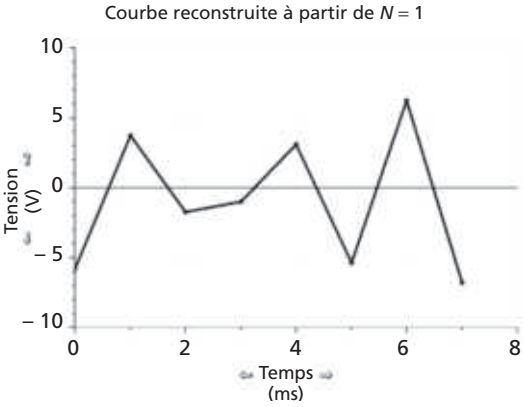



Pour $N = 5$ la courbe reconstruite ne ressemble déjà plus à une sinusoïde.

La grandeur période est néanmoins conservée.

La limite est le double de la période d'échantillonnage comme le montre la figure ci-dessous.

La sinusoïde n'est pas forcément reconnaissable, mais la grandeur période est conservée.




Pour une période en dessous du double de la période d'échantillonnage, il n'est plus possible de reconstruire le signal.

La période non reproduite en est l'indication principale.

L'exemple d'un échantillonnage où la période d'échantillonnage est égale à la période du signal est donné sur la figure précédente.

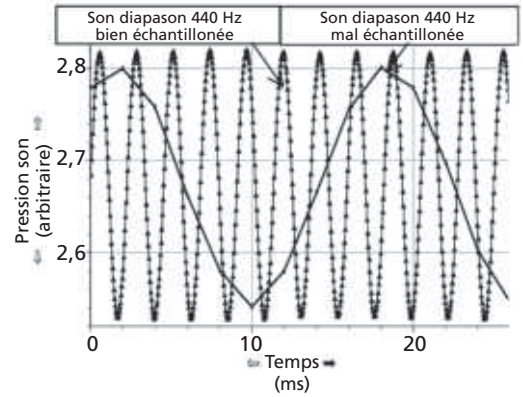
Pour reconstruire un signal correctement il faut au moins 10 points de mesure soit :

$$N = \frac{T}{T_e} = \frac{f_e}{f} = 10.$$

Pour une perte totale de la période du signal, il faut que l'échantillonnage :

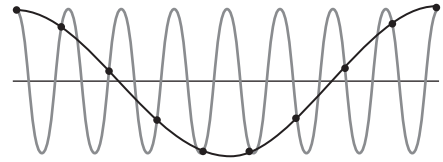
$$\frac{T}{T_e} \leqslant 2.$$

**f.**




En lecture graphique, la période donne : $T = 16$ ms et $f = 63$ Hz ce qui ne correspond pas du tout au signal du son échantillonné car celui-ci a une fréquence de 440 Hz.

L'échantillonnage n'étant pas correctement effectué, des échantillons sont prélevés sur plusieurs périodes différentes et pas aux mêmes endroits du sinus. Ainsi les points sont décalés régulièrement et à la reconstruction l'allure observée sera une autre sinusoïde mais de fréquence beaucoup plus faible. Un exemple est donné sur la figure ci-dessous.



Il faut donc échantillonner suffisamment le signal afin que sa reconstruction soit correcte : même si la forme est ressemblante, ce n'est pas le bon signal.

Conclusion : avant toute manipulation, il faut tenir compte de plusieurs paramètres lors d'une mesure avec un échantillonneur/CAN.

- **Plage d'entrée :** éviter les saturations ;
- **Pas (quantum) du convertisseur (résolution) :** si le signal est trop petit en tension, il ne sera pas possible de le décrire correctement car en dessous du pas de conversion ou peu de pas pour décrire l'évolution.
- **Fréquence ou période d'échantillonnage :** si l'échantillonnage est trop rapide (fréquence élevée) le signal risque de posséder beaucoup d'échantillons pour la même valeur de tension. Par contre, si l'échantillonnage est inférieur au critère de Shannon, alors il n'est plus possible de reproduire le signal. En général, il faut mieux prévoir 10 échantillons par période de signal.

***Commentaires***

L'étude d'un son est toujours un problème à cause des nuisances sonores lorsque l'on souhaite l'étudier en classe. Une solution à ce problème est d'avoir un enregistrement sur ordinateur du son souhaité et de placer le micro sur l'écouteur.

C'est la condition de Shannon qui s'écrit $f_e \geqslant 2$.

$f$ ou $T_e \geqslant \dfrac{T}{2}$ qui constitue la limite théorique de l'échantillonnage.

## Exercices

## Applications

### 1 Analogique ou numérique ?

Il s'agit d'un signal puisque l'information sur les battements du cœur est transportée par une tension électrique.

Ce signal est analogique puisque les variations de tension correspondent aux battements du cœur et se déroulent en continu durant le temps.

### 2 Message numérique

**a.** La tension ne prend que deux valeurs :
5V et – 5V.

**b.** Si toutes les millisecondes est associé un nombre 0 ou 1 alors le signal transporte un nombre, il s'agit donc d'un signal numérique.

**c.** Le nombre transporté s'écrit en binaire :
1101001110011.

### 3 Qualité d'une quantification

**a.** Graphe ① → 10 valeurs

Graphe ② → 4 valeurs

Graphe ③ → 19 valeurs.

**b.** Pour le graphe ① le pas est de 1,0 V ; pour le graphe ② le pas est de 3,0 V et pour le graphe ③ le pas est de 0,5V.

**c.** La qualité est meilleure lorsque la quantification est plus importante, cela permet de quantifier de plus petite variation.

### 4 Qualité d'un échantillonnage

**a.** Graphe ① → 20 échantillons

Graphe ② → 5 échantillons

Graphe ③ → 40 échantillons

**b.** Graphe ① → $T_e$ = 1,0 ms donc :

$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{1{,}0.10^{-3}} = 1{,}0 \text{ kHz}$$

Graphe ② → $T_e$ = 5,0 ms donc :

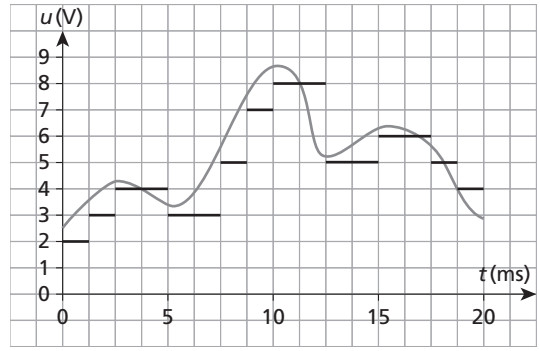
$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{5{,}0.10^{-3}} = 2{,}0.10^{2}\text{Hz}$$

Graphe ③ → $T_e$ = 0,50 ms donc :

$$f_e = \frac{1}{T_e} = \frac{1}{5{,}0.10^{-4}} = 2{,}0 \text{ kHz}$$

**c.** Le meilleur échantillonnage est réalisé pour le graphe ③ car c'est celui qui présente le plus d'échantillons.

### 5 Signal numérique




### 6 Échantillonnage

**a.** L'enregistrement durant 3,0 s et la période d'échantillonnage étant de $T_e$ = 1,0 ms, alors le nombre d'échantillons sont de $\dfrac{3{,}0}{1{,}0.10^{-3}} = 3{,}0.10^{3}$.

Soit environ 3 000 échantillons.

**b.** En considérant d'après l'énoncé qu'il est nécessaire d'avoir au moins 10 échantillons, il faut donc $10T_e$ = 10 ms. Le signal doit avoir une période $T$ d'au moins 10 ms pour être correctement reconstruit.

### 7 Conversion d'une température

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641*

### 8 Quantification

**a.** Le pas de conversion est déterminé par le rapport entre l'amplitude de la plage d'entrée et le nombre de valeurs prises par le convertisseur.

Ainsi : $p = \dfrac{10{,}0}{262\ 144} = 3{,}81.10^{-5}$V soit 38,1 µV.

**b.** Une variation de 20 mV est visible par le convertisseur car 20 mV est beaucoup plus grand que le pas de conversion.

Le rapport entre les deux valeurs donne :

$\dfrac{20.10^{-3}}{38{,}1.10^{-6}} = 525$ ce qui signifie qu'une variation de 20 mV peut être quantifiée par 525 pas de 38,1 µV.

**c.** La plage d'entrée du convertisseur est maintenant de 20,0 V, ce qui signifie que le pas de conversion est $p = \frac{20{,}0}{262\ 144} = 7{,}63.10^{-5}$ V soit 76,3 µV.

Bien que le pas de conversion ait augmenté, la variation de 20 mV reste visible lors de la conversion.

Le nombre de niveau de conversion a été divisé par 2 mais elle reste excellente.

### 9 Enregistrement d'un CD audio

**a.** La fréquence d'échantillonnage correspond aux nombres d'échantillons pris par seconde. Ainsi 44,1 kHz correspond à $44{,}1.10^3$ échantillons par seconde. L'enregistrement durant 3 min, le nombre de points d'enregistrements est donc de :

$3 \times 60 \times 44{,}1.10^3 = 7{,}94.10^6$ points d'enregistrement.

**b.** Pour coder chaque échantillon, il faut :

16 bits = 2 octets. Ainsi, il faut :

$2 \times 7{,}94.10^6 = 1{,}59.10^7$ octets = 15,9 Mo.

### 10 Codage RVB

**a.** Le codage du rouge et du vert est nul, le codage du bleu est 150 ce qui correspond à peu plus de la moitié de l'échelle en intensité du bleu. Il s'agit de bleu foncé.

**b.** La couleur verte est nulle, le mélange rouge et bleu donne du magenta.

**c.** Lorsque les trois nombres du code RVB ont la même valeur, la couleur observée est alors une nuance de gris. Il s'agit donc d'un gris dont l'intensité est moyenne.

### 11 Tableau de valeurs

**a.** Les trois dernières colonnes du tableau correspondent au code RVB des pixels d'une image. Ils ont tous la même valeur. Il s'agit donc d'une image en nuances de gris.

**b.** Les deux premières indiquent les coordonnées des pixels sur l'image.

**c.** Les valeurs de chaque échelle RVB sont comprises entre 0 pour le plus foncé et 255 pour le plus clair.

L'image est plutôt gris très clair car plus proche de 255 que de 0.

### 12 La photographie en astronomie

**a.** La dalle est composée de :

$752 \times 582 = 437\ 664$ pixels.

**b.** Chaque pixel étant codé sur 3 octets pour la couleur, il est nécessaire de stocker :

$437\ 664 \times 3 = 1\ 312\ 992$ octets = 1,31 Mo.

*Remarque :* la taille mémoire utilisée est importante mais en réalité une image est compressée de façon à réduire l'espace mémoire.

### 13 Lecture interférentielle

**a.** Il faut que les faisceaux réfléchis soient décalés de $\frac{\lambda}{2}$. Pour cela, les creux des disques optiques ont une profondeur de $\frac{\lambda}{4}$. Ainsi une partie du faisceau laser effectue un aller et retour sur le plat décalée de $\frac{\lambda}{2}$ par rapport au faisceau réfléchi sur le creux. Il y a donc interférence destructive entre les deux faisceaux réfléchis. (voir la **figure 17** p. 534 du manuel de l'élève).

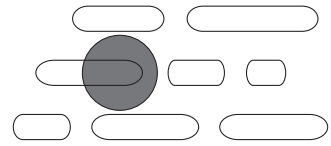
**b.** L'intensité reçue par le capteur est minimale, le capteur renvoi un niveau bas de tension.

**c.** Pour un disque gravé, il ne s'agit pas du même phénomène. Les creux sont remplacés par des points brûlés qui absorbent la lumière. L'effet est le même que pour les interférences destructives car la lumière renvoyée par un point opaque est quasi nulle et le capteur l'interprète comme un niveau bas.

### 14 Technologies de stockage optique

**a.** Il s'agit du phénomène de diffraction d'un faisceau laser par une lentille.

**b.**



Le schéma permet de mettre en évidence que la distance entre deux pistes doit être au moins égale au rayon du spot laser pour éviter les chevauchements de pistes. Le spot est centré sur la piste de lecture.

Ainsi pour le CD cette distance est $\frac{2{,}11}{2} = 1{,}06$ µm, pour le DVD cette distance est $\frac{1{,}32}{2} = 0{,}660$ µm et $\frac{0{,}58}{2} = 0{,}29$ µm pour le Blu-ray.

**c.** En diminuant la longueur d'onde du laser, la taille du spot est réduite.

En réduisant la taille des spots, cela permet d'avoir des pistes plus serrées donc plus nombreuses.

La longueur de la piste est plus grande et donc il est possible de placer plus de données dessus.

Ainsi la capacité est augmentée.

## Entraînement

### 15 Échantillonnage

**a.** Entre deux mesures, il y a une période d'échantillonnage soit : $T_e = \frac{1}{f_e} = \frac{1}{48.10^3} = 21\ \mu s$

**b.** Il faut 1 octet pour stocker un échantillon. Donc pour l'ensemble de l'enregistrement de 15 s on a : $48.10^3 \times 15 = 7{,}2.10^2$ ko.

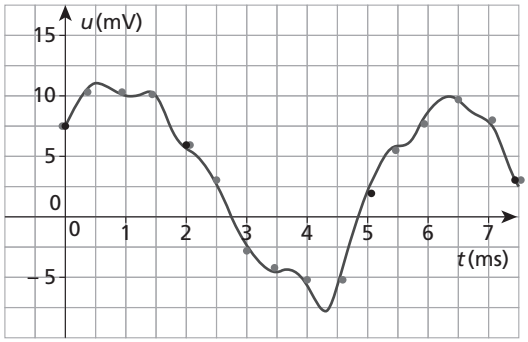
### 16 Enregistrement d'un son

**a.** Le signal est analogique.
La tension est l'image de la mesure d'une variation de pression sur un microphone.

**b.** $T_e = \frac{1}{f_e} = \frac{1}{2{,}0.10^3} = 0{,}50$ ms.

Cette durée est nommée *période d'échantillonnage*.

**c.**




Il y a 16 échantillons représentés en gris sur la figure.
*Remarque :* le résultat est retrouvé en effectuant le calcul $\frac{\Delta t}{T_e} = \frac{7{,}5}{0{,}50} = 15$ échantillons plus celui de l'origine, c'est-à-dire 16.

**d.** $T_e = \frac{1}{f_e} = \frac{1}{400} = 2{,}50$ ms.

Il y a 4 échantillons représentés en gris foncé sur le graphe de la figure.

**e.** L'échantillonnage le plus fidèle est celui qui possède le plus de mesures, il s'agit donc du premier cas.

### 17 Pèse-personne électronique

**a.** Le pas : $p = \frac{120}{2^8} = \frac{120}{256} = 0{,}469$ kg

Cette valeur correspond à la plus petite variation mesurable par la balance.

**b.** Les valeurs indiquées par la balance sont des multiples du pas. Ce n'est pas le cas de 53,6 kg.
La valeur la plus proche est 53,5 kg.

*Remarque :* ce type de balance indique la masse au demi-kilogramme.

### 18 Enregistrer des ultrasons

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

### 19 Interpolation de pixels

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

### 20 Disque vinyle

**a.** Les sillons d'un disque optique pressé sont formés de creux ou de plats discontinus. Dans le cas du disque vinyle, le sillon est continu.

**b.** Lorsque la pointe avance dans le sillon, celle-ci subit les frottements des bords. Ces frottements engendrent des vibrations sur la pointe. Ces vibrations sont caractéristiques du son enregistré sur le sillon, le signal est analogique puisque que les vibrations varient continûment dans le temps à l'image de l'ondulation gravée.

### 21 Lecture interférentielle d'un disque optique

**a.** La fréquence ou période, c'est un invariant du milieu.

**b.** $\lambda_n = vT$ donc $\lambda_n = \frac{c}{n}T = \frac{\lambda}{n}$.

**c.** La profondeur est de :
$\frac{\lambda_n}{4} = \frac{\lambda}{4n} = \frac{650}{4 \times 1{,}55} = 105$ nm.

**d.** La profondeur du creux dépend de la longueur d'onde du laser utilisé. Les longueurs d'onde des lasers du CD et du Blu-ray ne sont pas identiques à celui du DVD. Ainsi la profondeur des creux est différente.

Le CD a une profondeur de creux de 126 nm et elle est de 65 nm pour le Blu-ray.

## Approfondissement

### 22 Quantification d'une échelle de température

**a.** Les variations de la température sont très lentes, le convertisseur a le temps de convertir sans avoir besoin d'échantillonner la tension d'entrée.

**b.** Le capteur mesure entre – 40 °C et 60 °C.

C'est la plage de mesure du convertisseur.

Le capteur indique 0 V pour une température inférieure à – 40 °C et 10 V pour une température supérieure 60 °C.

**c.** Le pas de conversion en température :

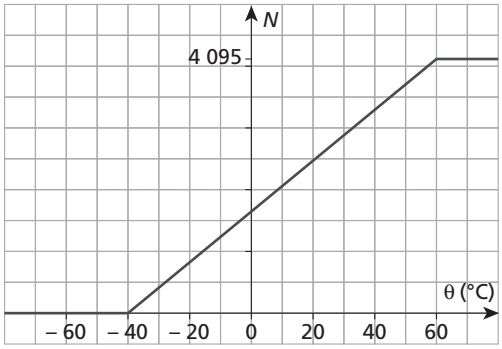
$p = \frac{\Delta\theta}{2^8} = \frac{100}{256} = 0{,}391$ °C.

**d.** L'affichage d'un dixième de degré n'est pas possible : il faudrait que le pas du convertisseur soit au maximum de 0,10 °C.

Il faut donc que $\frac{100}{2^n} < 0{,}1$ °C donc $2^n > \frac{100}{0{,}1}$ ainsi $2^n > 1\,000$ valeurs. Il faut au moins 1 000 valeurs de quantification. $2^{10} = 1\,024$ convient. Il faut donc au minimum un convertisseur de 10 bits.

**e.** – 40 °C est associé à 0 et 60 °C est associé à $2^{12} - 1 = 4\,095$.

**f.**




**g.** Graphiquement pour 0 °C : $N = 1\,638$
et pour 30 °C : $N = 2\,867$.

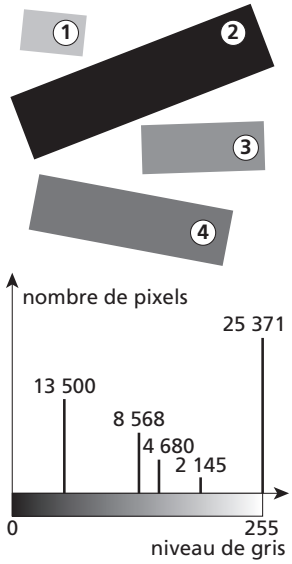
## 23 Autour d'un histogramme

**a.** Il y a 4 nuances de gris et du blanc puisqu'il y a 5 raies sur l'histogramme.

Pour le blanc il y a 25 371 pixels, pour les rectangles du plus clairs au plus foncés on a : 2 145, 4 680, 8 568 et 13 500.

**b.** La raie à 255 correspond au blanc qui compose la majeure partie de cette photo.

**c.**




Rectangle ① : 2 145 pixels
Rectangle ② : 13 500 pixels
Rectangle ③ : 4 680 pixels
Rectangle ④ : 8 568 pixels

**e.** Le rectangle le plus sombre devient blanc et disparaît dans le fond blanc.

## 24 Lecteur optique

**a.** D'après les données du tableau, il s'agit de sin θ (donc l'angle θ) et la longueur d'onde.

En effet, la longueur d'onde permet de diminuer le diamètre du spot ce qui est mis en évidence à travers l'évolution du DVD en HD-DVD.

De même, l'évolution HD-DVD en Blu-ray permet de mettre en évidence que l'angle θ permet de diminuer le diamètre du spot.

**b.**

| Lecteur | CD | DVD | HD-DVD | Blu-ray |
|---|---|---|---|---|
| θ (°) | 27 | 37 | 37 | 58 |

La focalisation est du plus en plus importante selon les technologies.

*Remarque :* Les lecteurs ont des lentilles de plus en plus convergentes.

C'est la principale évolution du Blu-ray sur le HD-DVD.

**c.** $\tan\theta = \frac{\frac{D}{2}}{f'} = \frac{D}{2f'}$ donc : $f' = \frac{D}{2\tan\theta}$

| Lecteur | CD | DVD | HD-DVD | Blu-ray |
|---|---|---|---|---|
| $f'$ (mm) | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 0,47 |

Plus l'angle est élevé, plus la distance focale est petite.

**d.** Pour des raisons de compatibilité, les lecteurs sont conçus de la même façon.

Donc, pour raccourcir la distance focale, il faut rapprocher la couche des données sur le disque optique.

**e.** Les données sont trop proches de la surface.

Le problème d'un disque optique, c'est les rayures. Le polycarbonate est là pour protéger la couche des données qui est placée suffisamment à l'intérieur pour être protégé. Ce n'est pas le cas avec 0,1 mm d'épaisseur.

*Remarque :* les premiers disques Blu-ray possédaient une protection. Depuis, TDK a mis au point un substrat plus résistant que le polycarbonate afin de protéger la couche des données.

### 25 Analyse d'un phénomène optique

**a.** Il s'agit de la valeur codant la nuance de gris du pixel, prenant des valeurs entières de 0 à 255 en codage RVB.

**b.** Le graphe montre qu'il y a :

$721 \times 1\,280 = 922\,880$ pixels formant cette photographie.

**c.** La nuance de gris est codée sur 8 bits, soit un octet. La photo comporte 922 880 pixels dont chacun est codé par 8 bits. Soit :

$922\,880 \times 8 = 7\,383\,040$ bits ou encore
922 880 octets ou 0,923 Mo.

**d.** Le phénomène observé ressemble à une figure de diffraction, où le pic le plus élevé correspond à la tache centrale. Il est plus élevé car la tâche centrale à une intensité plus élevée.

## Exercices de BAC

### 26 Étude d'un CD audio

**I.1.** Il s'agit d'un signal analogique car la tension transporte l'information du son en continu.

**2.** $T_e = \dfrac{1}{f_e} = \dfrac{1}{44{,}1.10^3} = 2{,}27.10^{-5}$ s $= 22{,}6$ µs.

$T_e$ est la durée minimum entre deux prises d'échantillons.

**3.** 44,1 kHz signifie qu'il y a $44{,}1.10^3$ échantillons enregistrés par seconde.

**4.** Chaque seconde il y a $44{,}1.10^3$ échantillons. Chaque échantillon est quantifié sur 16 bits.

16 bits = 2 octets.

Donc pour une seconde, il faut :

$2 \times 44{,}1.10^3 \times 2 = 1{,}76.10^5$ octets et 2 correspond au nombre de voie de l'enregistrement puisque celui-ci est stéréo tandis que l'autre 2 correspond aux nombres d'octet numérisant chaque échantillon.

Pour 74 min, on a : $74 \times 60 \times 1{,}41.10^3 = 783$ Mo.

*Remarque :* Attention, l'espace mémoire alloué à un CD ROM est de 650 Mo. Il est codé différemment et, de plus, une partie de la mémoire sert à l'adressage des données du disque.

**5.a.** La quantification est une méthode de découpage de la tension en valeur par pas ou quantum. Une valeur quantifiée est alors associée à une valeur numérique.

**b.** 14 bits donne 16 384 valeurs numériques et 16 bits donne 65 536 valeurs.

Plus le nombre de pas de quantification est élevé meilleure est la quantification. Le pas de quantification a été divisé par 4 ce qui permet de quantifier des variations plus faibles. Le son a un meilleur rendu.

La contrainte est que c'est plus gourmand en stockage mémoire, la taille du disque a été augmentée pour mettre plus de données.

**II.1.** Un autre phénomène limitant la taille du faisceau est la diffraction du faisceau laser passant par les bords de la lentille.

**2.** La longueur d'onde joue un rôle dans la taille du spot. Le DVD et le Blu-ray sont des exemples où la capacité a été augmentée par le choix d'une diode laser différente.

**3.** D'après la **figure 1** : $L = \dfrac{2{,}11}{2} + \dfrac{0{,}60}{2} = 1{,}4$ µm.

**4.** Le disque stocke l'information sous forme de creux et de plat. Si la distance entre les pistes est plus petite, la longueur de la piste sera plus longue donc plus de données inscrites. L'enregistrement sera donc plus long.

*Remarque :* La longueur piste pour un disque de 74 min est 5 772 m ; pour un disque de 80 min, elle vaut 6 240 m.

**III.1.** Il s'agit d'une radiation visible (rouge).

**2.** $\lambda_p = vT$ ainsi $\lambda_p = \dfrac{c}{n}T = \dfrac{\lambda}{n}$.

**3.** Il faut que cette différence de marche soit de $\dfrac{\lambda_p}{2}$.

**4.** La lumière parcourt un aller et un retour sur le plat et sur le creux. Il faut donc pour un aller $\dfrac{\lambda_p}{4}$ et pour un retour $\dfrac{\lambda_p}{4}$ pour la hauteur entre le creux et le plat. La profondeur du creux est donc de $\dfrac{\lambda_p}{4}$.

**5.** La longueur d'onde dans le milieu est :

$\lambda_p = \dfrac{780}{1{,}55} = 503$ nm.

La profondeur d'un creux est $\dfrac{\lambda_p}{4} = \dfrac{503}{4} = 126$ nm.

## 27 L'appareil photographique numérique

**1.a.** $100 \times 100 = 10\,000$ pixels soit 0,010 millions de pixels.

De nos jours, les appareils possèdent des définitions de 400 à 1 600 fois plus grandes.

**b.** Les niveaux de gris sont codés sur 4 bits (0000 à 1111) soit $2^4 = 16$ valeurs de gris.

**c.** Chaque pixel est codé sur 4 bits, soit la moitié d'un octet. Donc 4 bits = 0,5 octet.

La mémoire nécessaire est donc de :

$10\,000 \times 0{,}5 = 5\,000$ octets = 5,0 Ko.

**2.a.** Cette étape s'appelle l'échantillonnage spatial.

**b.** La grandeur quantifiée par le convertisseur est la tension électrique issue du capteur. Cette tension est associée à une intensité lumineuse.

**c.** On compte 4 niveaux de gris. Il faut $2^2 = 4$ niveaux de gris, soit 2 bits pour coder cette échelle.

**d.** On obtient le tableau suivant :

| | | | |
|---|---|---|---|
| 0 | 3 | 2 | 1 |
| 3 | 0 | 1 | 2 |
| 2 | 1 | 0 | 3 |
| 1 | 2 | 3 | 0 |

**e.** Les coordonnées de chaque pixel doivent être mémorisées.

**3.a.** La dalle comporte :

$3\,651 \times 2\,739 = 10\,000\,089$ pixels.

Soit près de 10 millions de pixels.

**b.** Résolution en en largeur :

$\frac{3\,651}{16{,}9} \times 2{,}54 = 549$ ppp.

Résolution en longueur : $\frac{3\,651}{12{,}7} \times 2{,}54 = 476$ ppp.

La résolution est donc de 476 ppp.

**c.** Cette résolution est supérieure à 300 ppp, donc l'image est de qualité photo.

**4.a.** Il y a 8 bits par couleur soit 256 valeurs par couleurs.

Il y a $256 \times 256 \times 256 = 16{,}7$ millions de couleurs.

**b.** Le codage du blanc est : RVB = (255, 255, 255) et le codage du noir est : RVB = (0, 0, 0).

**c.** Tous les nombres codant les couleurs R,V et B doivent avoir la même valeur.

## 28 Du CD audio au DVD audio

**1.a.** D'après Shannon-Nyquist $T \geqslant 2T_e$, $f = \frac{1}{T}$ et $f_e = \frac{1}{T_e}$. Il faut donc que : $2f \leqslant f_e$.

**b.** Il faut prendre la fréquence de l'harmonique la plus élevée. Dans ce cas il s'agit de 780 Hz.

D'après l'inéquation suivante : $f_e \geqslant 2f$, la fréquence d'échantillonnage doit être deux fois supérieures à la fréquence de la dernière harmonique.

Soit $2 \times 780 = 1{,}56$ kHz. Il faut donc échantillonner à une fréquence supérieure à 1 560 Hz.

**c.** Il faut se baser sur 20 kHz pour fixer la limite de l'échantillonnage car c'est la fréquence la plus élevée audible par l'homme.

La fréquence d'échantillonnage doit être au moins deux fois supérieure à la fréquence du signal.

Comme $f =$ 20 kHz la fréquence d'échantillonnage doit être au minimum de $f_e = 40$ kHz.

**d.** La fréquence d'échantillonnage respecte les conditions de Shannon-Nyquist comme :

$f_e = 44{,}1$ kHz > 40 kHz. Elle est supérieure à la fréquence limite trouvée précédemment correspondant à la fréquence limite de l'audible.

**e.** Ce format est dans les conditions de Shannon-Nyquist puisque 96 kHz est supérieure à 40 kHz, 40 kHz correspondant à la limite de l'échantillonnage.

**2.a.** $2^{16} = 65\,536$ valeurs pour 16 bits

$2^{24} = 16\,777\,216$ valeurs pour 24 bits.

Le rapport s'écrit : $\frac{2^{24}}{2^{16}} = 256$

Un codage sur 24 bits nécessite une capacité mémoire 256 plus grande pour un seul échantillon.

**b.** Pour le CD le pas est :

$$\frac{10{,}0}{2^{16}} = 1{,}53.10^{-4} \text{ V} = 153 \text{ µV}$$

Pour le DVD le pas :

$$\frac{10{,}0}{2^{24}} = 5{,}96.10^{-7} \text{ V} = 0{,}596 \text{ µV}$$

**c.** Une variation de 120 µV n'est pas détectée dans le cas du CD car cette valeur est inférieure au pas de quantification. Par contre cette variation est convertible dans le cas du DVD audio, puisque le pas est de 0,596 µV inférieur à la variation de tension. Cette variation peut être quantifiée en 200 valeurs différentes pour le DVD. Les faibles variations sonores seront moins bien rendues avec le CD qu'avec le DVD.

**3.a.** Pour le CD : $44{,}1.10^3$ échantillons par seconde.

Pour le DVD : $96.10^3$ échantillons par seconde.

**b.** Pour le CD codé sur 16 bits = 2 octets donc : $44{,}1.10^3 \times 2 = 88{,}2$ ko pour une seconde.

Pour le DVD audio codé sur 24 bits = 3 octets donc : $96.10^3 \times 2 = 288$ ko pour une seconde.

**c.** Pour le CD $88{,}2 \times 2 \times 74 \times 60 = 783.10^3$ ko = 0, 783 Go

Pour le DVD audio $288 \times 2 \times 74 \times 60 = 2{,}56.10^6$ ko = 2,56 Go

**d.** Il est nécessaire de compresser les fichiers car ils sont trop gourmands en espace mémoire et la compression permet de diminuer cet espace mémoire sans trop de perte de qualité.

## Rédiger une synthèse de documents

### 29 Évolution des supports optiques

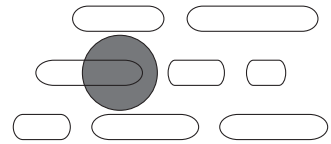
*Analyse de la question*

Cette question traite de la nouvelle évolution des disques optiques classique par rapport au disque holographique et permet de faire la différence entre deux types de support.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Un **phénomène de diffraction** limite le diamètre du spot frappant le disque optique. La taille de ce spot conditionne la **dimension des creux et des plats**, ainsi que la **distance entre les pistes**.

Le schéma ci-dessous montre la situation.



**2.** La **capacité** des disques optiques dépend du nombre de **creux et de plats** présent le long de la piste. Si les creux et les plats sont petits, plus leur nombre est grand et plus la piste est longue. Les données sont fixées sur une seule **couche**.

**3.** Le CD, le DVD et le Blu-ray ne sont que des évolutions techniques. Le principe physique de ces disques est identique.

**4.** Le HDV est basé sur un nouveau principe de **stockage des données,** celui-ci est placé dans un **hologramme** qui peut s'implanter dans l'**épaisseur** du disque. Un hologramme est une figure d'**interférence** entre deux faisceaux laser issu de la même source dont l'un transporte le message numérique.

*Remarque :* en réalité le codage numérique des données est aussi plus performant, au fur et à mesure de l'évolution des disques optiques, mais cette partie n'est pas traitée dans le programme.

À noter qu'il existe encore une piste de lecture de type DVD sur le HDV, servant à connaître la position des différents hologrammes.

# Chapitre 22 Transmissions de l'information

## Introduction au chapitre (p. 550)

Ce chapitre est une introduction sur les modes de transmissions.

Il permet de comprendre les différents types de transmissions modernes.

Le début du cours s'applique à définir ce qu'est une chaîne de transmission.

Les différents blocs sont définis et la différence entre transmission guidée et transmission libre est précisée.

La seconde partie traite des moyens d'évaluer une qualité de transmission : l'atténuation du signal et le débit binaire.

La dernière partie du cours est consacrée à l'étude des différentes transmissions : hertzienne, câble et fibre optique.

La première activité a pour but de comprendre la chaîne de transmission de la télévision hertzienne et les évolutions récentes de ce type de transmission.

La seconde activité traite d'un document comparatif entre le câble et deux types de fibres optiques.

La dernière activité de ce chapitre aborde la transmission dans un câble coaxial et les problèmes posés d'une telle transmission.

## Activités

### 1 De la TAT à la TNT (p. 552)

***Objectif***

Cette activité propose d'expliquer la chaîne de transmission permettant aux émissions télé de parvenir jusqu'aux récepteurs télés et le fonctionnement de canaux hertzien analogique ancien. L'évolution vers le numérique est abordée à travers l'étude de la TNT et de son intérêt devant la TAT. La TNT exploite la même chaîne de transmission, mais de nouvelles fonctions font leur apparition : la compression numérique et le multiplexage.

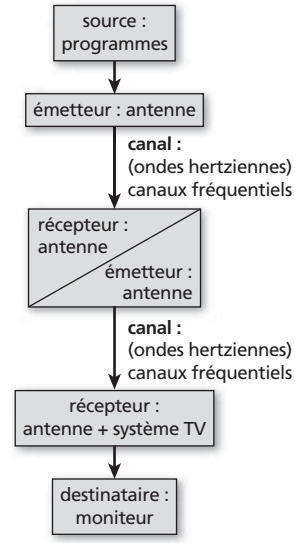
***Correspondance avec le programme***

• Identifier les éléments d'une chaîne de transmission d'informations.

• Recueillir et exploiter des informations concernant des éléments de chaînes de transmission d'informations et leur évolution récente.

***Corrigé***

**a.**



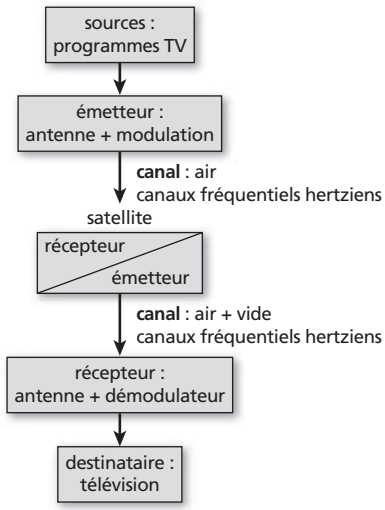
**b.** C'est l'air qui constitue le milieu de la transmission, donc le canal physique.

**c.** La modulation permet de décaler les signaux télés afin de les faire entrer dans un canal fréquentiel. Un canal physique est divisé en plusieurs canaux fréquentiels, afin de faire passer plusieurs signaux de télévision à travers un même canal physique.

**d.** La **compression** et le **multiplexage** font leur apparition avec la TNT. Le multiplexage permet de partager le canal fréquentiel en plusieurs chaînes. La compression permet de réduire la taille des fichiers à transmettre, elle permet donc d'augmenter de manière indirecte le débit de l'information transportée.

**e.** Sur la **figure 2** p. 552 du manuel de l'élève, on voit qu'il y a 6 chaînes pour un canal fréquentiel de capacité de 40 Mbit.s$^{-1}$. Le canal fréquentiel est divisé entre plusieurs chaînes. Il ne peut y avoir que 3 chaînes HD ou 6 chaînes SD.

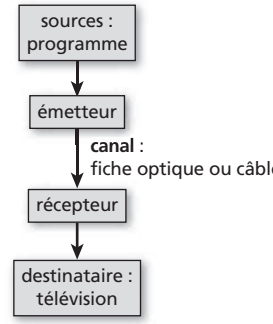
**f.** Il existe de nombreux modes de transmission de signaux TV, on peut citer la transmission par satellite. La transmission par satellite a l'avantage de n'utiliser qu'un émetteur placé sur une orbite géostationnaire. Ceci évite l'ensemble de tous les relais hertziens terrestres. Mais le coup de la mise en orbite et la durée de vie du satellite rendent cette solution finalement coûteuse.




Tous les canaux utilisés se servent des ondes électromagnétiques hertziennes pour transmettre l'information.

La télévision par câble ou fibre optique donne lieu à une transmission qui utilise soit un câble coaxial ou, plus récemment, une fibre optique afin de faire passer les signaux TV.

Cette méthode nécessite d'être connecté au réseau d'un opérateur qui n'est présent, en général, que dans les centres urbains.




Entre l'émetteur et le récepteur le signal est soit électrique pour le câble, soit lumineux pour la fibre optique.

La télévision ADSL exploite le câble téléphonique plus répandu mais nécessite d'être connecté à proximité d'un DSLAM, une sorte d'émetteur local. En effet le câble téléphonique est fortement atténué pour des débits élevés.

Le schéma est identique au précédent en ne comptant pas les multiples relais et différents commutateurs.

### *Commentaire*

La chaîne de transmission est volontairement simplifiée car ces connexions font partie d'un réseau, dont la chaîne de transmission est beaucoup plus complexe.

## 2 Transmission par câble ou par fibre optique ? (p. 553)

### *Objectif*

Cette activité est un comparatif entre deux types de transmission : le câble torsadé de catégorie 5 et deux fibres optiques. L'objectif est de montrer que chaque mode possède une place au sein d'une installation de communication.

### *Correspondance avec le programme*

- Exploiter des informations pour comparer les différents types de transmission.
- Caractériser une transmission numérique par son débit binaire.
- Évaluer l'affaiblissement d'un signal à l'aide du coefficient d'atténuation.

### *Corrigé*

**a.** On utilise une fibre monomode. L'inconvénient de ce type de fibre est de ne pouvoir être utilisé qu'en lignes droites : elle ne peut subir que de faibles rayons de courbure.

Il faut donc prévoir le passage de cette fibre.

Le coût d'installation est élevé, surtout dans l'infrastructure annexe afin de permettre le passage de la fibre.

**b.** Le coût dépend de la distance et du débit sur cette distance. C'est un moyen de comparaison entre les différents moyens de transmission.

**c.** Le câble est souvent préféré à la fibre pour son prix et la simplicité de son installation.

**d.** Le signal dans ce type de fibre subit une dispersion due aux différents modes avant que le problème de l'atténuation ne se pose. Elle est utilisée entre 100 m et 550 m puisque, pour une distance inférieure à 100 m, le câble en cuivre lui est préféré.

**e.** Les longueurs d'ondes utilisées par les émetteurs sont supérieures à 800 nm, il s'agit donc de sources infrarouges.

**f.** La fibre monomode ne peut pas subir de grandes déformations imposées par une installation locale.

**g.** La puissance reçue $P_r$ minimale est reliée à la puissance émise $P_e$ par :

$$\frac{P_r}{P_e} = \frac{5}{100} = \frac{1}{20}$$

donc l'atténuation s'écrit :

$$A = 10 \times \log(20) = 13 \text{ dB}$$

L'atténuation ne doit donc pas dépasser 13 dB.

Pour une fibre monomode, il faut prendre une source à 1 550 nm.

En effet, la source à 1 300 nm donne une atténuation trop élevée $A = \alpha L = 0{,}35 \times 40 = 14 \text{ dB} > 13 \text{ dB}$.

Pour la source à 1 550 nm :

$A = \alpha L = 0{,}19 \times 40 = 7{,}6 \text{ dB} < 13 \text{ dB}$.

**h.** Il n'y a pas de contact électrique avec une fibre optique. Il n'est pas nécessaire de prévoir des adaptations.

### *Commentaire*

Ce tableau est inspiré d'un tableau d'un cahier technique dont les informations ont été sélectionnées et complétées par nos soins.

## 3 Étude d'un câble (p. 554)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale permet d'étudier la transmission des signaux à travers une ligne guidée. Cette étude nous amène à mettre en évidence différents paramètres tels que la célérité de l'onde transmise, l'atténuation du signal dans la ligne et le phénomène de bruit engendré par une source externe.

### *Correspondance avec le programme*

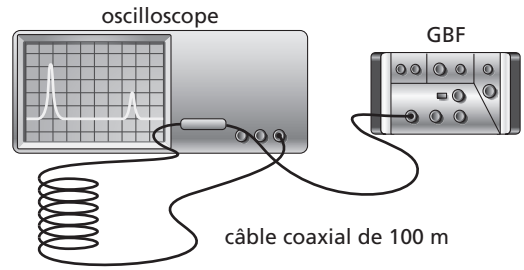
Mettre en œuvre un dispositif de transmission de données (câble, fibre optique).

### *Matériel par binôme*

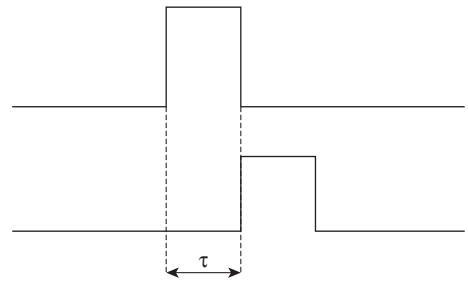
- Un oscilloscope minimum 20 MHz de bande passante.
- Un câble coaxial d'impédance 50 Ω de 100 m avec prise BNC mâle à chaque extrémité.
- Un câble torsadé non blindé de 25 m.
- Un câble torsadé blindé de 25 m.
- Un générateur basse fréquence 2 MHz.
- Un adaptateur BNC en T ou Y.

### *Corrigé*

**a.** Le schéma de montage oscilloscope, GBF et 100 m de câble coaxial est le suivant.




Pour mettre en mode impulsion sur le GBF il faut mettre fonction carrée puis utiliser symétrie pour diminuer le temps à l'état haut de la tension carré. Les tensions d'entrée et de sortie sont décalées.
La mesure de l'intervalle de temps donne :



Le retard est $\tau = 400$ ns mesuré à l'oscilloscope. Comme les fronts ne sont pas forcément verticaux, on peut retenir $\tau = 4{,}00.10^2 \pm 5$ ns. La lecture est faite à l'oscilloscope analogique. En utilisant un oscilloscope numérique avec curseur, il est possible de diminuer cette incertitude de lecture.

La longueur du câble est de 100 m mesurée préalablement au centimètre près. En effet, le câble est enroulé, il est difficile de le mesurer à cause sa longueur importante : $d = 100{,}00 \pm 0{,}01$ m

La célérité s'écrit $v = \dfrac{d}{\tau} = \dfrac{100{,}00}{4{,}0.10^{-7}} = 2{,}5.10^8$ m.s$^{-1}$

**b.** $\dfrac{v}{c} = \dfrac{2{,}5.10^8}{3{,}00.10^8} = 0{,}83 = 83$ %

ce qui signifie que les ondes électriques vont à 83 % de la célérité de la lumière dans le vide. La célérité dans le câble donné par le constructeur est de 85 % de la célérité de la lumière dans le vide.

Soit un écart relatif $\varepsilon = \left|\dfrac{83-85}{85}\right| = 0{,}02 = 2$ %
ce qui n'est pas si mal…

L'incertitude sur la mesure de $v$ peut s'écrire :

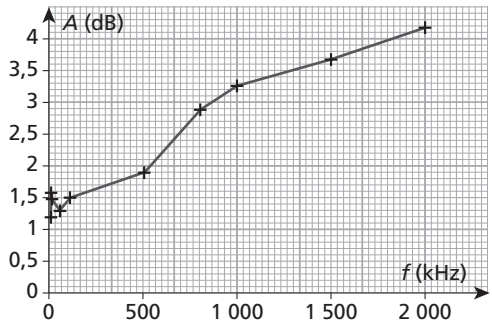
$\dfrac{\Delta v}{v} = \dfrac{\Delta d}{d} + \dfrac{\Delta \tau}{\tau} = \dfrac{0{,}01}{100} + \dfrac{5}{400} = 1{,}3$ %

$v = 2{,}5.10^8 \pm 0{,}033.10^8$ m.s$^{-1}$

**c.** et **d.** Il faut absolument que la ligne soit adaptée sinon, il se peut que le niveau d'entrée soit supérieur au niveau de sortie à cause des ondes réfléchies en bout de ligne. La lecture s'effectue sur la valeur maximale des tensions à l'oscilloscope.

| $f$ (kHz) | 1,0 | 5,0 | 10,0 | 50,0 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|
| $A$ (dB) | 1,2 | 1,6 | 1,5 | 1,3 | 1,5 |
| $f$ (kHz) | 500 | 800 | $1{,}0.10^3$ | $1{,}5.10^3$ | $2{,}0.10^3$ |
| $A$ (dB) | 1,9 | 2,9 | 3,3 | 3,7 | 4,2 |

Les résultats obtenus entre 1 kHz et 2 MHz sont donnés par la courbe suivante.

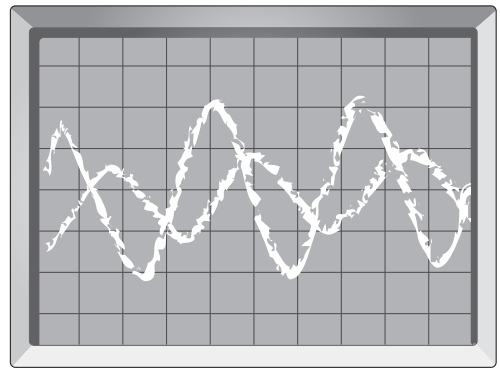



Donc l'atténuation dépend de la fréquence.

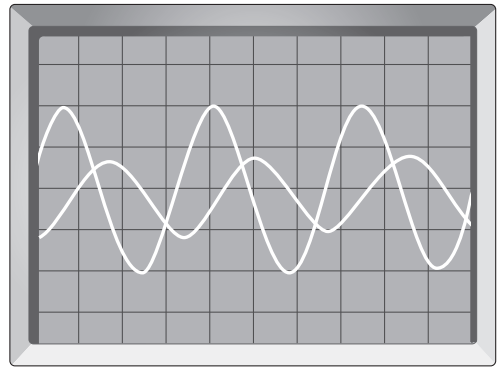
**e.** Différents essais sont faits avec le câble coaxial, un câble torsadé et câble non torsadé.

Exemple de différences entre un signal bruité ① et non bruité ②.

① signal bruité



② signal non bruité



Avec le câble coaxial et câble torsadé blindé le bruit est minimal, tandis que pour un câble torsadé simple le bruit est plus grand.

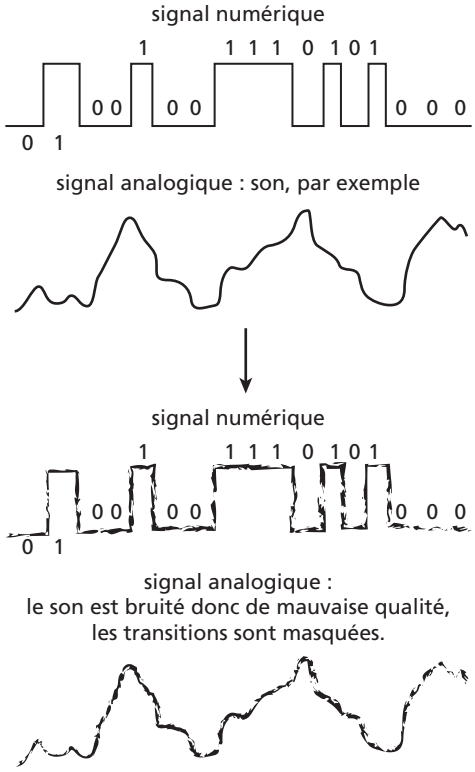
Le blindage des câbles est là pour réduire les bruits pouvant intervenir dans les signaux en protégeant des rayonnements électromagnétiques externes.

**f.** Un signal numérique est en général réalisé avec uniquement deux transitions nettes de la tension, alors qu'un signal analogique est formé d'une infinité de transitions.

Ces transitions peuvent être masquées par le bruit lorsque celui-ci est grand.

La qualité est ainsi détériorée.

Prenons l'exemple suivant pour illustrer : le signal analogique est déformé donc peu exploitable tandis que le signal numérique est déformé mais exploitable puisque l'on reconnaît encore le message.




***Commentaires***

• Pour les questions **c.** et **d.**, il est impossible de mesurer ces tensions avec un voltmètre classique en position AC.

En effet les voltmètres ont en général une bande passante de autour de 100 kHz. Au-delà de cette fréquence la valeur lue est fausse.

L'atténuation s'accentue pour des fréquences encore plus élevées supérieures à 10 MHz, fréquence impossible à générer avec un GBF « classique ».

• Pour les questions **e.** et **f.**, l'adaptation d'impédance d'un tel montage est nécessaire afin d'éviter le phénomène d'onde réfléchie en bout de ligne (même si le circuit est ouvert).

Pour adapter une ligne il faut que l'impédance de sortie du GBF soit de 50 Ω, le câble doit être de la même valeur et bien le brancher sur la borne d'entrée de l'oscilloscope qui possède une impédance d'entrée de 50 Ω.

Cette adaptation est surtout importante lors de la mesure de l'atténuation car un signal d'entrée peut se retrouver d'un niveau supérieur en sortie. Pour la troisième et dernière partie il n'est pas nécessaire d'adapter puisque l'on cherche à mettre en évidence uniquement le phénomène de bruit.

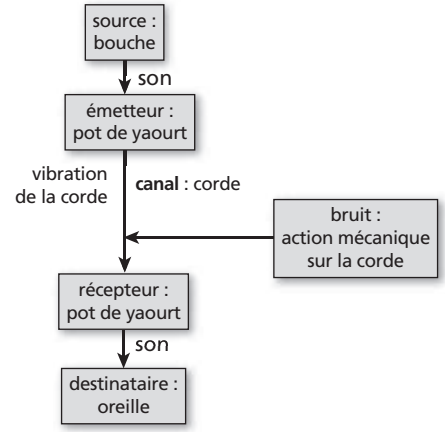
On peut montrer (mais c'est hors programme) qu'une ligne non adaptée ne convient pas à la transmission de signaux car ils sont alors déformés. De fait toutes les lignes de transmission sont adaptées en entrée, en câble et en récepteur. Par exemple, un câble Ethernet est adapté et possède une impédance caractéristique de 100 Ω.

# Exercices

## Applications

### 1 Le téléphone en pots de yaourt

**a.** Le schéma représentant la chaîne de transmission est :

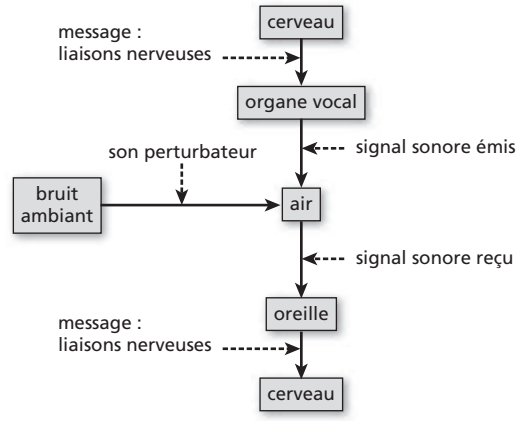



**b.** Le dialogue n'est pas simultané puisqu'il n'y a qu'un seul canal de communication.

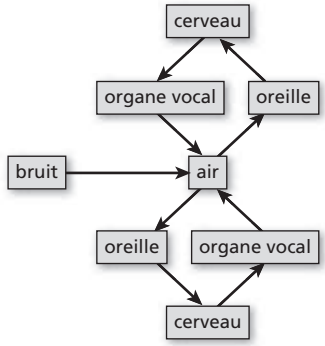
Il faudrait doubler le système, avec une autre paire de pots de yaourt et un autre fil.

### 2 Conversation

**a.**



**b.**




Le canal est utilisé 2 fois en simultané, ce qui risque de rendre les messages incompréhensibles.

### 3 Téléphone filaire

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

### 4 Une chaîne de transmission

**a.** Source : main
Émetteur : la radiocommande
Canal : air
Récepteur : récepteur radio
Bruit : sources électromagnétiques externes
Destinataire : commande de la voiture.

**b.** Source : main
Émetteur : la télécommande
Canal : air
Récepteur : récepteur infrarouge
Bruit : sources infrarouges externes
Destinataire : commande de la télévision.

**c.** Source : ordinateur
Émetteur : interface USB
Canal : câble électrique
Récepteur : interface USB
Bruit : sources électromagnétiques externes
Destinataire : imprimante.

### 5 Message numérique

**a.** La période d'un bit sur le graphe est $T_B = 0{,}1$ ms.

**b.** Le débit binaire est donc :

$$D = \frac{1}{T_B} = \frac{1}{0{,}1.10^{-3}} = 1{,}0.10^4 \text{ bit.s}^{-1}$$

### 6 Fibre optique et atténuation

**a.** L'atténuation $A$ est reliée à la distance $L$ et au coefficient $\alpha_{dB}$ par la relation :

$$A = \alpha_{dB} L.$$

Pour 1,0 km, on a : $A(1\text{ km}) = 1{,}0 \times 4{,}0 = 4{,}0$ dB

Pour 20 km, on a : $A(20\text{ km}) = 20 \times 4{,}0 = 80$ dB

**b.** L'atténuation $A$ est reliée à la puissance d'entrée $P_e$ et la puissance de sortie $P_s$ par la relation $A = 10 \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$ qui donne $P_s = 10^{-\frac{A}{10}} P_e$.

Les pertes correspondent à la différence entre l'entrée et la sortie, soit :

$$P_{pertes} = P_e - P_s = P_e - 10^{-\frac{A}{10}} P_e = P_e\left(1 - 10^{-\frac{A}{10}}\right)$$

ainsi, par rapport à la puissance d'entrée :

$$\frac{P_{pertes}}{P_e} = 1 - 10^{-\frac{A}{10}}$$

Ainsi pour 1 km on a :

$$\%\text{pertes} = \frac{P_{pertes}}{P_e} = 1 - 10^{-\frac{4}{10}} = 60\ \%$$

Ainsi pour 20 km on a :

$$\%\text{pertes} = \frac{P_{pertes}}{P_e} = 1 - 10^{-\frac{80}{10}} = 100\ \%$$

### 7 Capacité d'un canal

Le débit de 50 kbit.s$^{-1}$ signifie qu'il y a émission de 50 kbit en une seconde donc le temps de transfert de 68 Mbit est $t = \frac{1 \times 68.10^6}{50.10^3} = 1{,}4.10^3$ s
soit environ 23 minutes.

### 8 Atténuation dans un câble

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

### 9 Durée d'émission

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

### 10 Niveau de transmission

**a.** L'atténuation $A$ est reliée à la puissance d'entrée $P_e$ et la puissance de sortie $P_s$ par la relation : $A = 10 \log\frac{P_e}{P_s}$. Une puissance de sortie égale à 50 % de la puissance d'entrée correspond à une atténuation :

$$A = 10 \log\frac{1}{0{,}50} = 3{,}0 \text{ dB}.$$

Pour 10 % on a : $A = 10 \log\left(\frac{1}{0{,}10}\right) = 10$ dB.

Pour 1 % on a : $A = 10 \log\left(\frac{1}{0{,}01}\right) = 20$ dB

**b.** Le coefficient d'atténuation est lié à la longueur $L$ de la ligne par $\alpha_{dB} = \frac{A}{L}$

donc $\alpha_{dB} = \frac{3{,}0}{10} = 0{,}30 \text{ dB.m}^{-1}$

**c.** On en déduit :

$L = \dfrac{A}{\alpha_{dB}} = \dfrac{10}{0{,}30} = 33$ m pour la ligne qui ne transmet que 10 % de la puissance et

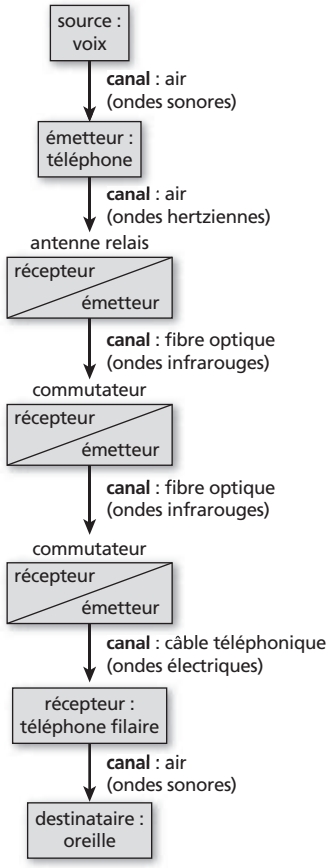
$L = \dfrac{A}{\alpha_{dB}} = \dfrac{20}{0{,}30} = 66$ m pour celle qui transmet 1,0 % de la puissance.

## Entraînement

### 11 Le réseau de téléphonie mobile

**a.** Les commutateurs servent à connecter les téléphones au réseau.

**b.**




**c.** Entre le téléphone portable et le rassemblement d'antennes, le canal physique est l'air, les ondes transmises sont électromagnétiques appartenant au domaine de l'hertzien.

Le canal est la fibre optique entre rassemblement d'antenne et commutateur, ainsi qu'entre les commutateurs. L'information est transportée par une onde électromagnétique appartenant à la famille des infrarouges.

Le canal entre le commutateur et le téléphone filaire est le câble torsadé. L'information est transportée par une onde électromagnétique ou onde électrique.

**d.** Il y a d'abord une conversion des vibrations sonores mécaniques en vibrations électriques. Ensuite, comme le réseau est numérique, il faut effectuer une conversion analogique-numérique des vibrations électriques.

### 12 Étude d'une fibre optique

**a.** L'atténuation $A$ se calcule à partir de la puissance d'entrée $P_e$ et la puissance de sortie $P_s$ par :

$A = 10 \log\dfrac{P_e}{P_s} = 10 \log\dfrac{1{,}00.10^{-3}}{12{,}0.10^{-6}} = 19{,}2$ dB

**b.** Le coefficient d'atténuation de la fibre de longueur $L$ est $\alpha_{dB} = \dfrac{A}{L}$ donc $\alpha_{dB} = \dfrac{19{,}2}{20} = 0{,}96$ dB.km$^{-1}$.

**c.** Les pertes correspondent à la différence entre l'entrée et la sortie, soit :

$$P_{pertes} = P_e - P_s = P_e - 10^{-\frac{A}{10}} P_e = P_e\left(1 - 10^{-\frac{A}{10}}\right)$$

$$\%\text{pertes} = \frac{P_{pertes}}{P_e} = 1 - 10^{-\frac{19{,}2}{10}} = 98{,}8\ \%$$

**d.** La taille du fichier est 40 Go $= 40 \times 8 = 320$ Gbit.

La durée de son transfert est donc :

$$t = \frac{1 \times 320}{10} = 32 \text{ s.}$$

### 13 Transmission ADSL

**a.** La longueur maximale $L$ du câble de coefficient d'atténuation $\alpha_{dB}$ pour ne pas dépasser l'atténuation $A_{max}$ est $L = \dfrac{A_{max}}{\alpha_{dB}} = \dfrac{45}{7{,}9} = 5{,}7$ km.

**b.** La taille du fichier est :

640 Mo $= 640 \times 8 = 5{,}12.10^3$ Mbit.

Il faut donc une durée de transfert

$$t = \frac{1 \times 5{,}12.10^3}{25} = 2{,}0.10^2 \text{ s} = 3{,}4 \text{ min.}$$

### 14 Un record du monde

*Exercice résolu dans le manuel de l'élève, p. 641.*

### 15 Le format Thunderbolt

**a.** La taille d'un DVD est :

4,70 Go $= 4{,}70 \times 8 = 37{,}6$ Gbit.

La durée de transfert au format Thunderbolt est donc : $t = \dfrac{1 \times 37{,}5}{10} = 3{,}8$ s.

**b.** Un support de transmission possible est le câble torsadé.

**c.** La ligne de transmission ne mesure pas plus de 3,0 m à cause de l'atténuation dans le câble : plus la longueur augmente plus l'atténuation est forte.

### 16 Transmission par fax

**a.** Le nombre de pixels par cm est donné par le calcul $\frac{300}{2{,}54} = 118$ pixels par cm.

Pour la hauteur : $118 \times 29{,}7 = 3{,}50.10^3$ pixels.

Pour la largeur : $118 \times 21{,}0 = 2{,}48.10^3$ pixels.

Il y a donc $3{,}50.10^3 \times 2{,}48.10^3 = 8{,}68.10^6$ pixels, chacun codé sur 1 bit.

Il est donc nécessaire de transférer $8{,}68.10^6$ bits.

**b.** Il faut une durée $t = \frac{1 \times 8{,}68.10^6}{14\ 400} = 6{,}03.10^2$s soit environ 10 minutes.

**c.** Pour transférer l'image plus rapidement il faut augmenter le débit ou diminuer la définition de l'image.

*Remarque :* les télécopieurs utilisent le réseau RNIS (ou NUMERIS) dont le débit est de 56 kbit.s$^{-1}$, la résolution est de 400 ppp.

La durée de transmission est beaucoup plus faible que celle calculée dans l'exercice car les images sont compressées, elles occupent ainsi moins de place mémoire donc il y a beaucoup moins de données à transmettre.

## Approfondissememnt

### 17 Multiplexage

**a.** La fonction multiplexage permet de faire passer les différents signaux dans un seul canal physique simultanément.

**b.** Le débit binaire est partagé en 4, chaque signal à un débit de 0,25 Mbit.s$^{-1}$.

Le multiplexage diminue donc le débit de chaque signal.

*Remarque :* le multiplexage est un moyen de faire passer différents signaux dans un canal physique identique. Le multiplexage temporel qui est facile à réaliser mais à l'inconvénient de diminuer le débit.

Il existe d'autres types de multiplexage :

• le multiplexage fréquentiel, qui s'apparente à une modulation partageant le canal physique en différents canaux fréquentiels,

• le multiplexage statistique, amélioration du multiplexage temporel car ce qui est transmis est uniquement ce qui est émis.

### 18 Télévision numérique

**a.** La fréquence d'échantillonnage impose le nombre d'échantillons par seconde $13{,}5.10^6$ échantillons pour une seconde pour le signal de luminance et $6{,}75.10^6$ échantillons pour une seconde pour chaque signal de chrominance.

**b.** Pour le signal de luminance chaque échantillon est codé sur 10 bits soit, pour une seconde :

$$13{,}5.10^6 \times 10 = 13{,}5.10^7 \text{ bits} = 135 \text{ Mbit.}$$

Pour les signaux chrominance chaque échantillon est codé sur 10 bits soit, pour une seconde :

$$2 \times 6{,}75.10^6 \times 10 = 13{,}5.10^7 \text{ bits} = 135 \text{ Mbit.}$$

**c.** Il faut donc que le débit soit capable de transférer l'intégralité des bits, il faut donc un débit de :

$$135 + 135 = 270 \text{ Mbit.s}^{-1}.$$

**d.** Il faut arriver à diminuer le débit, il faut donc compresser le flux des données.

### 19 Notion de canal fréquentiel

**a.** Le téléphone reçoit les messages et peut envoyer des messages en simultané. Il faut donc un émetteur et un récepteur sur le téléphone.

**b.** Il existe un seul canal physique : l'air.

**c.** Les canaux fréquentiels permettent de faire passer deux signaux dans deux canaux différents et permettent ainsi une transmission ascendante et descendante en simultané. Une personne peut écouter et parler en même temps.

## Exercices de BAC

### 20 Test d'un câble

**1.a.** Le générateur d'impulsion est décalé par rapport au point A, l'impulsion met 0,050 µs à arriver jusqu'au point A.

**b.** On mesure t = 1,025 − 0,050 = 0,975 µs.

**c.** L'onde électrique est réfléchie et parcourt donc deux fois la longueur $L$ donc :

$$v = \frac{2L}{\tau} = \frac{2 \times 100}{0{,}975.10^{-6}} = 2{,}05.10^8 \text{ m.s}^{-1}.$$

**d.** L'onde est atténuée à cause de l'absorption dans le milieu.

**e.** $A = 20 \log\frac{(U_i)_{max}}{(U_r)_{max}} = 20 \times \log\frac{2{,}0}{1{,}3} = 3{,}7$ dB

**2.a.** Il n'y a pas de défaut sur ce câble car aucune onde réfléchie n'est observée.

Il n'est pas possible de déterminer la longueur du câble car aucune onde n'est réfléchie.

Il faudrait déconnecter la sortie de façon à créer une onde réfléchie.

**b.** Il y a deux défauts car deux impulsions sont renvoyées.

La première à :

$$d_1 = \frac{v\tau_1}{2} = \frac{2{,}07.10^8 \times (0{,}55 - 0{,}05).10^{-6}}{2} = 52 \text{ m.}$$

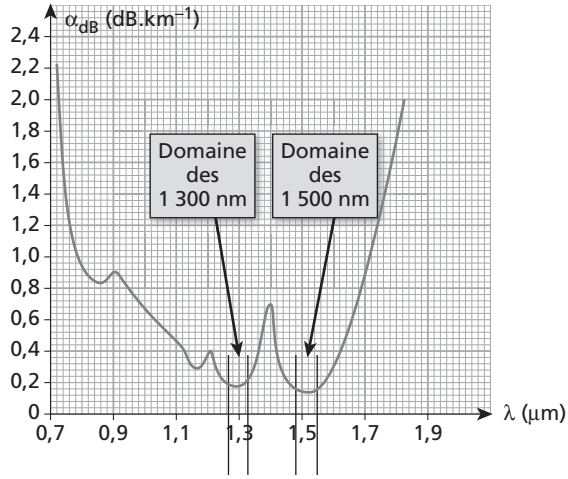
La seconde à :

$$d_2 = \frac{v\tau_2}{2} = \frac{2{,}07.10^8 \times (0{,}875 - 0{,}05).10^{-6}}{2} = 85 \text{ m.}$$

## 21 Transmission par une fibre monomode

**1.a.** Les longueurs d'ondes sont supérieures à 800 nm, il s'agit donc des ondes électromagnétiques infrarouges.

Les ondes de lumière visible ne sont pas utilisées car l'atténuation est trop grande dans ce domaine.




**b.**

Domaine des 1 300 nm : 1 275 nm – 1 330 nm

Domaine des 1 500 nm : 1 500 nm – 1550 nm

**c.** À 1 550 nm on a 0,14 dB.km$^{-1}$ : c'est là que l'atténuation est la plus faible.

**2.a.** L'atténuation est :

$$A = L\alpha = 10 \times 0{,}14 = 1{,}4 \text{ dB.}$$

**b.** On a : $A = 10 \log\left(\frac{P_e}{P_s}\right)$ donc :

$$P_s = P_e 10^{-\frac{A}{10}} = 250 \times 10^{-\frac{1{,}4}{10}} = 1{,}8.10^2 \text{ mW.}$$

**c.** La transmission peut fonctionner puisque le capteur peut détecter des puissances inférieures à 180 mW.

**3.a.** $n = \frac{c}{v}$ donc $v = \frac{c}{n} = \frac{3{,}0.10^8}{1{,}45} = 2{,}07.10^7$ m.s$^{-1}$.

**b.** $\tau = \frac{L}{v} = \frac{30.10^3}{2{,}07.10^8} = 1{,}5.10^{-4}$ s = 0,15 ms.

**c.** Par définition on a : $D = \frac{1}{T_B}$ donc :

$$T_B = \frac{1}{D} = \frac{1}{10.10^6} = 1{,}0.10^{-7} \text{ s} = 0{,}10 \text{ μs}$$

**d.** Il y a 1,00 Mo = 1,00 × 8 = 8,0 Mbit à transférer.

Il faut donc $\frac{8.10^6}{10.10^9} = 8{,}0.10^{-4}$ s = 0,80 ms.

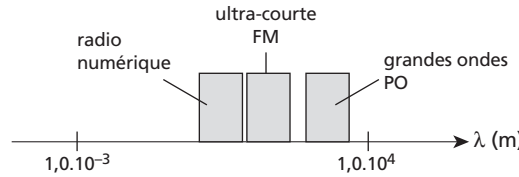
**e.** La durée de la transmission est la somme de la durée de propagation et de la durée du paquet.

Soit 0,15 + 0,80 = 0,95 ms.

La durée de la transmission est donc de 0,95 ms.

## 22 Les différentes émissions radio

**1.**




**a.** Le visible est situé entre 400 et 800 nm. Le domaine est donc A.

**b.** 150 kHz et 260 kHz donne 1 154 m < λ < 2 000 m

87,5 MHz à 108 MHz donne 2,78 m < λ < 3,43 m

174 à 230 MHz donne 1,30 m < λ < 1,72 m

Tous ces domaines appartiennent aux ondes hertziennes.

**2.a.** La largeur du canal fréquentiel pour les grandes ondes est 260 – 150 = 110 kHz. On peut donc, en théorie, avoir 11 canaux de 10 kHz.

**b.** France Inter émet sur une fréquence centrale de 162 kHz. La bande va donc de 162 kHz ± 5 kHz. Soit l'intervalle [157 kHz ; 167 kHz].

On a 157 kHz < $f$ < 167 kHz

donc 1 796 m < λ < 1 910 m.

**c.** L'antenne doit être de l'ordre de $\frac{\lambda}{4}$

donc 449 m < $\frac{\lambda}{4}$ < 478 m.

La taille de l'antenne réelle est de 350 m, ce qui est proche de ces longueurs d'ondes.

**3.a.** La taille de la bande FM est :

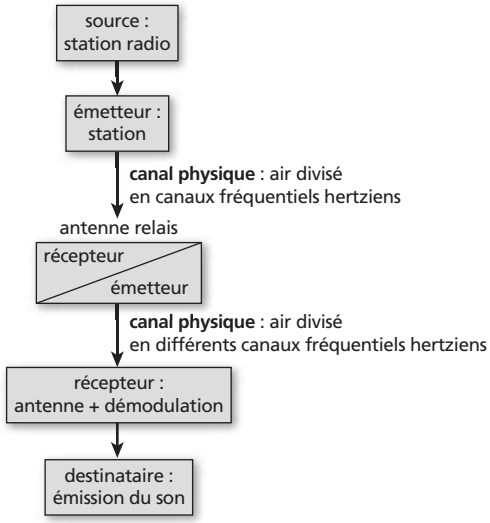
$108 - 87{,}5 = 20{,}5$ MHz donc on peut en théorie y installer $\frac{20{,}5.10^6}{200.10^3} = 102$ canaux FM.

**b.** La taille de l'antenne est de l'ordre de $\frac{\lambda}{2}$.

En prenant le milieu de la bande de fréquences (98 MHz) cela nous donne $\lambda = 3{,}0$ m soit $\frac{\lambda}{2} = 1{,}5$ m.

La taille d'une antenne FM est de l'ordre du mètre.

**c.**




Le bruit peut venir d'une source électromagnétique qui diffuse sur les fréquences des canaux.

**d.** Les avantages de la radio FM sont les qualités du son retransmis, la possibilité d'avoir un nombre plus élevé de stations radios sur une bande de fréquences, une antenne plus petite donc moins coûteuse. L'inconvénient est que cela nécessite beaucoup d'antennes relais, contrairement aux grandes ondes qui n'ont besoin que d'une seule antenne pour toute la France et les environs.

**4.a.** La fonction permettant de multiplier les transmissions dans un canal est le multiplexage des données.

**b.** Pour faire chuter le débit, il est nécessaire de compresser les données.

## Rédiger une synthèse de documents

### 23 Évolution des transmissions

*Analyse de la question*

Cette question traite des évolutions technologiques nécessaires afin d'augmenter le nombre d'informations transmises, et ainsi d'augmenter le débit de l'information.

Ces nouvelles fonctions ne sont pas étudiées spécifiquement dans ce chapitre.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Nécessité de compacter les données pour en réduire le volume.

La **compression** des données nécessite des systèmes informatiques capables de compresser et décompresser rapidement.

La compression-décompression est réalisée avec un logiciel appelé **codec** possédant un algorithme permettant de coder les données à transmettre.

Ces logiciels doivent fonctionner très rapidement afin de traiter des flux de données importants comme ceux d'un film par exemple.

**2.** Nécessité de partager le **canal physique et fréquentiel** lors de transmissions. Le **multiplexage** permet de faire passer plusieurs signaux dans un même canal fréquentiel.

Le débit est alors partagé entre les émetteurs et les récepteurs.

Cette fonction permet de multiplier les transmissions.

En effet, un canal fréquentiel qui ne transmettait auparavant qu'une seule chaîne analogique peut communiquer 6 chaînes SD de la TNT.

**3.** Les informations sont sécurisées à l'aide de la **cryptographie**.

Il est plus simple de crypter en numérique qu'en analogique. Les informations sont cryptées afin de permettre la confidentialité du message. Comme exemple de cryptage, on peut citer les chaînes payantes comme Canal + où il est nécessaire de posséder un « décodeur » afin de pouvoir décrypter les émissions cryptées.

# BAC Épreuve expérimentale

## 1 Célérité des ultrasons dans l'air (p. 574)

### *Objectif*

Ce sujet constitue une alternative aux activités expérimentales proposées p. 36 et 58 du manuel de l'élève, qui réalisent également la mesure de la célérité du son dans l'air : pour la première, en utilisant des claps sonores, pour la deuxième, à l'aide d'ultrasons périodiques. Ce sujet permet de réaliser la mesure de la célérité en exploitant soit la relation entre retard et distance, soit en exploitant la relation entre période et longueur d'onde. Comme les deux activités présentes dans les chapitres 1 et 2, c'est l'occasion de poser la question des incertitudes de mesures.

### *Correspondance avec le programme*

• Connaître et exploiter la relation entre retard, distance et célérité.

• Définir, pour une onde progressive sinusoïdale, la période, la fréquence et la longueur d'onde.

• Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité.

• Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier qualitativement et quantitativement un phénomène de propagation d'une onde.

• Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la période, la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive sinusoïdale.

### *Corrigé*

**a.** Plusieurs protocoles sont possibles.

**Première possibilité :**

▶ Brancher l'émetteur à ultrasons sur le GBF en mode salves.

▶ Relier également le GBF à la synchronisation externe du système d'acquisition et synchroniser l'acquisition sur l'émission de la salve d'ultrasons.

▶ Brancher un récepteur à ultrasons sur une entrée du système d'acquisition.

▶ Régler l'acquisition avec une fréquence d'échantillonnage supérieure à 500 kHz et une durée d'acquisition inférieure à l'écart entre deux salves.

▶ Positionner l'émetteur et le récepteur face à face (si possible sur un rail), mesurer la distance $L$ les séparant et évaluer l'incertitude associée.

▶ Faire l'acquisition et mesurer le retard $\tau$ à la réception. Évaluer l'incertitude associée.

▶ Reproduire la mesure pour au moins huit positions.

▶ Tracer $L$ en fonction de $\tau$, modéliser les points par une fonction affine et déterminer graphiquement son coefficient directeur, égal à la célérité du son dans l'air. (Ceci peut être fait sur papier millimétré ou sur le tableur-grapheur.)

**Deuxième possibilité :**

▶ Utiliser un générateur de salves comme ci-dessus, et deux récepteurs reliés au système d'acquisition. L'acquisition n'a pas à être synchronisée.

▶ La distance mesurée est la distance entre les deux récepteurs, le retard mesuré est le retard entre les deux réceptions.

▶ Le traitement est identique.

**Troisième possibilité :**

▶ Brancher l'émetteur d'ultrasons sur le GBF délivrant une tension sinusoïdale de fréquence 40 kHz.

▶ Relier deux récepteurs au système d'acquisition, réglé à une fréquence d'échantillonnage supérieure à 500 kHz et une durée d'acquisition voisine de 0,2 ms. Régler l'acquisition en mode permanent.

▶ Mesurer la période $T$ des signaux reçus (en mesurant plusieurs périodes) et évaluer l'incertitude associée.

▶ Positionner les récepteurs face à l'émetteur, l'un derrière l'autre, si possible sur un rail. Fixer le récepteur le plus proche de l'émetteur et positionner le deuxième récepteur de sorte que les signaux reçus soient en phase. Noter la position du deuxième récepteur.

▶ Reculer le deuxième récepteur de manière à faire défiler vingt positions où les signaux sont en phase. Mesurer la distance $d$ parcourue et évaluer l'incertitude associée.

▶ Déduire de la mesure précédente la valeur de la longueur d'onde $\lambda$ et l'incertitude associée.

▶ Calculer la célérité du son dans l'air.

**b.** Les évaluations des incertitudes des mesures de durées doit se faire en considérant, sur l'écran, les différentes positions des curseurs acceptables pour la mesure. Pour les mesures de longueurs, on peut considérer qu'une incertitude de 5 mm est acceptable.

**c.** La vitesse s'obtient, dans les deux premiers protocoles, comme le coefficient directeur de la droite tracée. L'incertitude associée est calculée d'abord sur une seule mesure en utilisant $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \tau}{\tau}$, puis en divisant le résultat par la racine carrée du nombre de mesures effectuées d'après le document fourni. Pour le troisième protocole, l'incertitude sur $\lambda$ s'obtient en divisant l'incertitude sur $\lambda$ par le nombre de longueurs d'onde mesurées. La célérité s'obtient par $v = \frac{\lambda}{T}$ et l'incertitude associée s'obtient ensuite par $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta T}{T}$.

**d.** En fonction du protocole utilisé, plusieurs commentaires sont possibles au vu du calcul de l'incertitude. L'incertitude sur $v$ passe toujours par un calcul d'incertitude relative, où les sommes des incertitudes relatives liées aux mesures font apparaître les paramètres pour lesquels l'incertitude peut être réduite.

***Commentaire***

Dans le premier protocole, les droites tracées peuvent ne pas être des fonctions linéaires. En effet, il arrive que les émetteurs-récepteurs soient positionnés à l'intérieur de boîtiers, de sorte qu'il est difficile de mesurer les distances entre les endroits où les sons sont réellement émis et reçus.

## 2 Diffraction des ondes lumineuses (p. 575)

***Objectif***

Ce sujet complète l'activité expérimentale 4 du chapitre 3, en laissant davantage d'autonomie à l'élève.

***Correspondance avec le programme***

Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier ou utiliser le phénomène de diffraction dans le cas des ondes lumineuses.

***Corrigé***

**a.**

**Diffraction par une fente**

▶ Faire un schéma définissant la largeur de la fente, la distance entre la fente et l'écran, la largeur de la tache centrale sur l'écran et la demi-ouverture angulaire de cette tache.

▶ Pour chaque fente, mesurer ces grandeurs puis les consigner dans un tableau.

▶ Tracer la courbe représentant la demi-ouverture angulaire en fonction de l'inverse de la largeur de la fente.

**Mesurer l'épaisseur d'un cheveu**

▶ Faire la mesure précédente, en remplaçant la fente par un cheveu.

▶ Placer la demi-ouverture mesurée sur la courbe précédente.

**b.** Le professeur devra vérifier que l'écran n'est pas trop proche de la fente (sinon la tache centrale sera trop petite), que le laser est en incidence normale sur la fente (sinon la largeur « utile » n'est pas celle de la fente) et que l'écran est également perpendiculaire à la direction incidente. Vérifier enfin que l'élève ne prévoie pas de placer son œil devant le faisceau pour effectuer les mesures.
Le professeur devra aussi s'assurer que les axes ont une échelle correcte pour tracer la courbe.

**c.** Si la courbe tracée est une droite passant par l'origine, alors la demi-ouverture angulaire $\theta$ est bien inversement proportionnelle à la largeur de la fente $a$.
La relation étant $\theta = \frac{\lambda}{a}$, l'incertitude relative est $\frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{\Delta a}{a}$ si la longueur d'onde du laser est parfaitement connue. Ceci permet de donner l'incertitude sur la mesure de la largeur du cheveu.

***Commentaire***

Des exemples de mesures sont données pour l'activité 4 du chapitre 3, ainsi qu'un exemple de courbe $\theta = f\left(\frac{1}{a}\right)$.

## 3 Mouvement d'un projectile dans le champ de pesanteur uniforme (p. 576)

***Objectif***

Ce sujet vient compléter les activités proposées dans le chapitre 6 en laissant plus d'autonomie à l'élève.

### *Correspondance avec le programme*

Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour étudier un mouvement.

### *Corrigé*

**a.** Le professeur devra vérifier que l'acquisition est soignée et que les outils de zoom ont bien été utilisés pour pointer toujours le même point, facilement repérable, de l'objet en mouvement sur la vidéo.

Les calculs de vitesse devront être réalisés soit à l'aide des fonctions de dérivation du logiciel, soit par approximation affine.

**b.** Si les courbes tracées vérifient les modèles (constante pour la vitesse horizontale, affine pour la vitesse verticale), alors les frottements peuvent être considérés comme négligeables.

**c.** Proposition de protocole :

► Créer la grandeur énergie cinétique et la calculer.

► Créer la grandeur énergie potentielle de pesanteur et la calculer.

► Créer la grandeur énergie mécanique et la calculer.

► Tracer l'énergie mécanique de la balle en fonction du temps. Ceci permet, si la courbe est constante, de valider l'hypothèse des frottements négligeables.

**d.** En pratique, les frottements ne sont pas réellement négligeables : sur un lancer de balle de tennis à un ou deux mètres, on peut voir une légère diminution de l'énergie mécanique, notable au début et à la fin du mouvement (là où la vitesse est la plus grande). Cette discussion peut être menée par l'élève.

**e.** La conclusion attendue doit être brève et formulée avec le vocabulaire scientifique adapté.

## 4 Étude énergétique d'un oscillateur mécanique (p. 577)

### *Objectif*

Ce sujet complète l'activité 2 du chapitre 8 p. 217 et l'activité 3 du chapitre 9 p. 243 traitant chacune du mouvement du pendule simple.

### *Correspondance avec le programme*

Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence l'amortissement d'un oscillateur mécanique.

### *Corrigé*

**a.** L'élève doit enregistrer le mouvement d'un pendule simple à l'aide d'une webcam dans l'air puis dans l'eau, à partir d'une même position initiale du pendule. Il peut estimer cette position à partir d'un rapporteur fixé sur le point d'attache du fil, permettant de mesurer aisément l'angle de départ.

Pour obtenir une vidéo soignée, l'élève doit choisir une durée d'enregistrement de l'ordre de 3 secondes minimum. Le nombre d'images par seconde est imposé par la webcam et apparaît comme la durée qui sépare deux points consécutifs dans les données du tableur.

Afin que l'échelle des longueurs soit la bonne, l'élève doit penser à réaliser un étalonnage de l'échelle sur son enregistrement. Il peut par exemple pointer les positions extrêmes du pendule et spécifier au logiciel que la distance les séparant est égale à 50 cm (longueur du pendule).

Il doit aussi choisir une origine de position pour les axes. Il peut, par exemple, commencer l'enregistrement avec le pendule à l'équilibre, le monter à la position angulaire choisie initialement puis la lâcher (cet instant, facilement repérable sur la vidéo, peut aussi être choisi pour l'origine des temps). Ceci permet de repérer l'origine comme le point d'équilibre du pendule (altitude nulle). Mais une origine arbitraire est également possible.

L'élève doit créer une colonne correspondant à l'énergie mécanique $E_m$. Pour cela, il doit d'abord créer une colonne vitesse $v$ (pour calculer l'énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$) et une colonne énergie potentielle de pesanteur $E_{pp} = mgz$. Puis enfin, l'élève crée une colonne énergie mécanique $E_m = E_c + E_{pp} = \frac{1}{2}mv^2 + mgz$.

Afin d'estimer l'influence des frottements sur le pendule selon la nature du fluide, l'élève doit enregistrer deux films (l'un dans l'air et l'autre dans l'eau) dans les mêmes conditions initiales et les comparer.

L'élève appelle le professeur qui vérifie sa démarche.

**b.** L'élève réalise le pointage des différentes positions du pendule en fonction du temps.

Pour créer la colonne vitesse $v$, il y a plusieurs possibilités :

• Soit le tableur propose déjà deux colonnes $v_x$ et $v_z$ représentant les coordonnées de la vitesse sur les deux axes. Dans ce cas, l'élève crée une colonne vitesse $v$ est écrivant que $v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$.

• Soit le tableur ne propose que les coordonnées $x$ et $z$ de la position. L'élève doit alors créer une colonne $v_x$ et une colonne $v_z$ des coordonnées de la vitesse en écrivant qu'à une date $t_i$ quelconque, $v_x(t_i) = \frac{x(t_{i+1}) - x(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$ et que $v_z(t_i) = \frac{z(t_{i+1}) - z(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$. Enfin, il crée la colonne vitesse $v$ avec $v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$.

• Soit le logiciel de pointage permet de créer directement les colonnes $v_x$ et $v_z$ par une opération mathématique de dérivation des coordonnées $x$ et $z$ de la position : $v_x = \frac{dx}{dt}$ et $v_z = \frac{dz}{dt}$. La vitesse s'obtient toujours de la même manière par une colonne $v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$.

Ainsi, il peut créer une colonne énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2}mv^2$ avec $m = 0{,}200$ kg.

Pour la colonne énergie potentielle de pesanteur $E_{pp} = mgz$, $z$ est la coordonnée verticale (axe vers le haut) de la position, déjà proposée par le logiciel lors du pointage. La valeur de la pesanteur $g$ est prise égale à 9,8 $m.s^{-2}$.

Pour finir, l'élève crée la colonne énergie mécanique $E_m = E_c + E_{pp} = \frac{1}{2}mv^2 + mgz$.

Enfin, il peut, à l'aide des fonctionnalités du logiciel, tracer l'énergie mécanique en fonction du temps pour les deux situations.

L'élève appelle le professeur qui vérifie la création de ces colonnes.

**c.** En calculant la variation relative de l'énergie mécanique $\frac{\Delta E_m}{E_m}$ sur une durée de 1,0 s (la période théorique vaut 1,4 s), il est possible de comparer l'influence des frottements dans les deux cas.

• Dans l'air, on trouve par exemple, pendant une seconde, $\frac{\Delta E_m}{E_m} = -0{,}05$ (le signe négatif vient du fait que l'énergie mécanique décroît au cours du temps).

• Dans l'eau, pendant la même durée, on trouve $\frac{\Delta E_m}{E_m} = -0{,}65$.

Les frottements sont bien plus importants dans l'eau que dans l'air. Dans l'eau, l'énergie mécanique perd 65 % de sa valeur pendant une seconde alors qu'elle ne perd que 5 % dans l'air.

## 5 Dosage conductimétrique de l'eau de chaux (p. 578)

### *Objectif*

L'objectif de ce TP est de vérifier grâce à un titrage conductimétrique la concentration d'une eau de chaux utilisée pour traiter des fumées de déchetteries. Les élèves sont amenés à élaborer le protocole expérimental de ce dosage, puis à le mettre en œuvre, après validation par le professeur. L'exploitation des résultats obtenus inclut l'estimation de l'incertitude relative sur la concentration de l'eau de chaux.

### *Correspondance avec le programme*

• Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce chimique par titrage par le suivi d'une grandeur physique et par la visualisation d'un changement de couleur, dans le domaine de la santé, de l'environnement ou du contrôle de la qualité.

• Interpréter qualitativement un changement de pente dans un titrage conductimétrique.

• Reconnaître un acide, une base dans la théorie de Brönsted.

• Utiliser les symbolismes $\rightarrow$, $\leftarrow$ et $\rightleftharpoons$ dans l'écriture des réactions chimiques pour rendre compte des situations observées.

• Réactions quasi-totales en faveur des produits : mélange d'un acide fort et d'une base forte dans l'eau.

• Évaluer, à l'aide d'une formule fournie, l'incertitude d'une mesure obtenue lors de la réalisation d'un protocole dans lequel interviennent plusieurs sources d'erreurs.

• Réaction entre un acide fort et une base forte : aspect thermique de la réaction.

### *Liste de matériel*

Pour un poste de travail : voir le doc. 2 p. 578 du manuel de l'élève.

### *Corrigé*

**a.** Estimation de la concentration en ions $HO^-$ de l'eau de chaux

S'il se dissout 1,2 g de chaux dont la mise en solution est représentée par l'équation $CaO + H_2O \rightarrow Ca^{2+} + 2HO^-$, la concentration en ions $HO^-$ est donc :

$c'_B = \frac{2 \times 1{,}2}{56}$ soit approximativement 0,043 $mol.L^{-1}$.

Pour que le volume équivalent d'acide chlorhydrique de concentration $c_A = 1{,}70.10^{-2}$ mol.L$^{-1}$. soit compris entre 10 et 15 mL, soit une quantité de matière comprise entre 0,17 et 0,25 mmol, il faut prélever un volume compris en 4 et 6 mL de l'eau de chaux ci-dessus. L'utilisation de la pipette jaugée de 5 mL s'impose. Les autres pipettes donneraient un volume équivalent trop important ou trop faible.

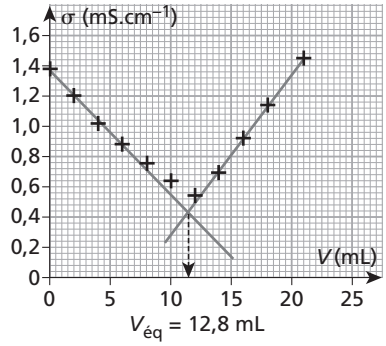
Le protocole est le suivant :

- ▶ Rincer la burette et la remplir, l'ajuster au zéro.
- ▶ Prélever 5 mL d'eau de chaux à la pipette jaugée préalablement rincée, diluer avec une quarantaine de millilitres d'eau distillée. Introduire un barreau aimanté et placer sur un agitateur magnétique.
- ▶ Plonger les électrodes convenablement rincées et branchées au conductimètre.
- ▶ Ajouter l'acide par portions de 2 mL et noter la conductivité σ (ou la conductance $G$) de la solution en fonction du volume ajouté.

**c.** Les ions calcium et chlorure sont des ions spectateurs. La réaction acido-basique qui a lieu lors du dosage a donc pour équation $H_3O^+ + HO^- \rightarrow 2\ H_2O$.

**d.** Les données expérimentales sont regroupées dans le tableau suivant :

| V (mL) | 0,0 | 2,0 | 4,0 | 6,0 | 8,0 | 10,0 | 12,0 | 14,0 | 16,0 | 18,0 | 21,0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| σ (mS.cm$^{-1}$) | 1,38 | 1,2 | 1,01 | 0,88 | 0,75 | 0,64 | 0,54 | 0,69 | 0,92 | 1,14 | 1,45 |




Le volume équivalent $V_{éq}$ est déterminé par la rupture de pente : $V_{éq} = 12{,}8$ mL.

La concentration en ions $HO^-$ de l'eau de chaux est donc : $c_B = \dfrac{12{,}8 \times 1{,}70.10^{-2}}{5{,}00} = 0{,}0435$ mol.L$^{-1}$.

La concentration de l'eau de chaux (donc en CaO apporté) est moitié moindre soit :

$c = 0{,}0217$ mol.L$^{-1}$, soit une concentration massique de $0{,}0217 \times 56{,}1 = 1{,}22$ g.L$^{-1}$, c'est effectivement, la solubilité de la chaux dans l'eau.

**e.** Les sources d'erreurs sont $c_A$, $V_{éq}$ et $V_B$. L'incertitude relative sur la concentration en ions $HO^-$ est donc :

$$\frac{\Delta c}{c} = \frac{0{,}1}{12{,}8} + \frac{0{,}005}{1{,}70} + \frac{0{,}05}{5{,}0} = 0{,}021$$

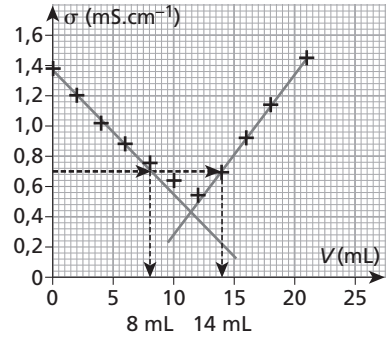
d'où l'incertitude absolue :

$\Delta c = 0{,}021 \times 0{,}0435 = 9{,}0.10^{-4}$ mol.L$^{-1}$

et l'expression du résultat : $c_B = 0{,}043 \pm 0{,}001$ mol.L$^{-1}$.

**f.** Le graphe du titrage permet de savoir à quel volume d'acide chlorhydrique ajouté correspond la concentration moitié de la concentration initiale ; deux valeurs sont possibles : 8 mL (excès de chaux) et 14 mL (défaut de chaux).

Dans le premier cas, le lavage est efficace puisqu'un excès de chaux est présent dans les eaux de lavage ; dans l'autre cas, il ne l'est pas puisqu'il y a eu un défaut de chaux, donc du chlorure d'hydrogène en excès n'a pas été neutralisé et a pu s'échapper.




**g.** La libération d'énergie est :

$Q = 56.10^3 \times 0{,}043 \times 5{,}0.10^{-3} = 12$ J

L'échauffement des 50 mL de la solution contenue dans le bécher, si on suppose que la masse volumique de la solution est voisine de celle de l'eau, est donc :

$\Delta\theta = \dfrac{12}{4{,}1.50} = 5{,}8.10^{-2}$ K, ce qui est insignifiant.

## 6 Détermination d'une constante d'acidité (p. 579)

### *Objectif*

L'objectif de ce TP est de déterminer expérimentalement la constante d'acidité d'un acide aminé : la valine. Les élèves doivent proposer un protocole expérimental permettant de réaliser des solutions contenant des quantités données de forme acide et de forme basique de la valine puis de mesurer le pH de ces solutions. Les données expérimentales sont traitées au moyen d'un tableur-grapheur pour éviter

de reproduire des calculs fastidieux. Enfin, à l'aide de tables, le spectre RMN de la valine (limité aux protons portés par des atomes de carbone) doit être analysé et relié à la formule topologique fournie.

### *Correspondance avec le programme*

• Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour déterminer une constante d'acidité.

• Mesurer le pH d'une solution aqueuse.

• Relier un spectre RMN simple à une molécule organique donnée, à l'aide de tables de données ou de logiciels.

• Identifier les protons équivalents. Relier la multiplicité du signal au nombre de voisins.

### *Liste de matériel*

Pour un poste de travail : voir le doc. 2 p. 579 du manuel de l'élève.

### *Corrigé*

**a.** et **b.** Les solutions demandées contenant des quantités de matière de AH et de $A^-$ dont la somme est constante, elles peuvent être obtenues en partant d'une solution de valine contenant $10{,}0.10^{-5}$ mol de AH, et en lui ajoutant des quantités précises de la solution d'hydroxyde de sodium fournie. Comme la réaction $AH + HO^- \rightarrow A^- + H_2O$ est considérée comme quasi-totale, les quantités de matière d'ion $HO^-$ à ajouter se déduisent simplement d'un bilan de matière de la réaction.

► Pour préparer une solution contenant $n(AH) = 10{,}0.10^{-5}$ mol de AH, il faut prélever le volume $V_{AH}$ donné par :

$$V_{AH} = \frac{n(AH)}{c_{AH}}$$

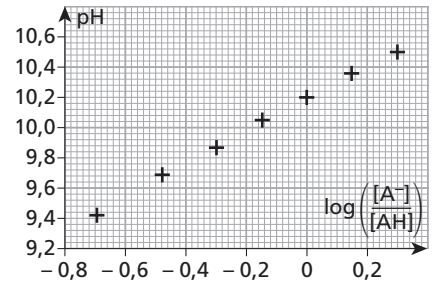
$$V_{AH} = \frac{10{,}0.10^{-5}}{1{,}00.10^{-2}} = 10{,}0.10^{-3} \text{ L soit } 10{,}0 \text{ mL.}$$

Il faut donc utiliser la pipette jaugée de 10 mL.

► Il faut y ajouter 3,0 mL de solution d'hydroxyde de sodium de même concentration, puis 4,0, puis 5,0 puis 6,0 puis 7,0 mL, pour cela, il faut utiliser la burette graduée, comme pour un titrage.

► Une trentaine de millilitres d'eau distillée doivent être ajoutés pour que la solution ait un volume de 40 mL. Les graduations du bécher fournissent une indication suffisante.

**c.** Les valeurs de $n(AH)$ et $n(A^-)$ étant connues, il est possible de calculer (log ($[A^-]/[AH]$) et de les reporter sur le graphe demandé.




$$pH = f\left(\log\left(\frac{[A^-]}{[AH]}\right)\right)$$

**d.** L'expression de la constante $K_a$ permet d'écrire :

$$pH = pK_a + \log\left(\frac{[A^-]}{[AH]}\right).$$

Le $pK_a$ est donc la valeur du pH quand

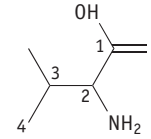
$$\log\left(\frac{[A^-]}{[AH]}\right) = 0.$$

Graphiquement, $pK_a = 10{,}2$ (valeur expérimentale 9,6).

**e.** Les six H équivalents qui donnent un doublet autour de 0,8 ppm ont dont un voisin : il s'agit des atomes d'hydrogène portés par les groupements $—CH_3$ en bout de chaîne.

L'hydrogène qui donne un heptuplet autour de 1,8 ppm a sept voisins : il s'agit de l'hydrogène lié au carbone n° 3 de la chaîne (lié également à deux groupements $—CH_3$ et au carbone 2 porteur d'un H).

Enfin, l'hydrogène qui donne un doublet autour de 3,4 ppm a un seul voisin : il s'agit de l'hydrogène porté par le carbone n° 2 de la chaîne.




## 7 Entretien de lentilles de contact (p. 580)

### *Objectif*

L'objectif de ce TP est de mettre en évidence l'importance des comprimés de neutralisation utilisés dans certains dispositifs d'entretien des lentilles de contact. En effet, du peroxyde d'hydrogène est utilisé pour la désinfection des lentilles. Étant très irritant, il doit être éliminé ensuite, ce qui est possible grâce à des comprimés de catalase qui catalyse sa décomposition. Les élèves sont amenés à élaborer un protocole de la solution désinfectante commerciale puis à réaliser un dosage colorimétrique de la solution diluée (fournie).

En comparant le résultat obtenu à celui qui est indiqué pour le cas où le comprimé de neutralisation a été utilisé, ils peuvent en déduire le rôle joué par la catalase et l'intérêt du comprimé de « neutralisation » dans le cas des lentilles de contact.

### *Correspondance avec le programme*

• Mettre en œuvre une démarche expérimentale pour mettre en évidence le rôle d'un catalyseur.

• Extraire et exploiter des informations sur la catalyse, notamment en milieu biologique et dans le domaine industriel, pour en dégager l'intérêt.

• Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce chimique par titrage par le suivi d'une grandeur physique et par la visualisation d'un changement de couleur, dans le domaine de la santé, de l'environnement ou du contrôle de la qualité.

### *Liste de matériel*

**Pour un poste de travail**

• Une burette graduée de 25 mL et son support.

• Une pipette graduée de 20 mL.

• Une pipette jaugée de 20 mL.

• Une poire à pipeter ou tout autre système de pipetage.

• Une éprouvette graduée de 100 mL.

• Un bécher de 100 mL.

• Un verre à pied.

• Un erlenmeyer de 100 mL.

• Un feutre pour pouvoir écrire sur le verre.

• Un agitateur magnétique.

• Un agitateur en verre.

• Un flacon contenant 50 mL de solution S', solution d'eau oxygénée diluée vingt fois (la solution commerciale est le produit pour l'entretien des lentilles Oxysept® vendu en pharmacie mais on peut évidemment préparer une solution de peroxyde d'hydrogène équivalente).

• Une pissette d'eau distillée.

• Un flacon de 100 mL de solution **acidifiée** de permanganate de potassium de concentration molaire apportée 2,00. $10^{-2}$ mol.$L^{-1}$ étiqueté « solution $S_p$ de permanganate de potassium acidifiée ».

• Du papier filtre.

### *Corrigé*

**a.** Soit $c'$ la concentration de la solution S' à préparer et soit $V$ le volume de solution S à prélever dont la concentration est 20 fois supérieure.

Au cours d'une dilution, la conservation de la quantité de matière de soluté se traduit par :

$$20\,c'V = c'V' \text{ donc } V = \frac{V'}{20} = \frac{100,0}{20} = 5,0\,\text{mL}.$$

Il faut donc prélever ce volume $V$ à l'aide d'une pipette jaugée, le verser dans une fiole jaugée de 100 mL que l'on remplit aux trois quarts d'eau distillée. Ensuite, agiter pour homogénéiser puis remplir la fiole jusqu'au trait de jauge, éventuellement à l'aide d'une pipette simple. Homogénéiser.

**b.**

▶ Le professeur vérifiera, lors de l'appel, l'agencement du dispositif de titrage, c'est-à-dire :
• le remplissage correct de la burette,
• le positionnement de la burette par rapport à l'erlenmeyer,
• la présence d'un dispositif d'agitation.
▶ Il s'assurera que le candidat réalise le titrage avec soin et qu'il réalise bien des ajouts goutte à goutte à l'approche de l'équivalence.
▶ Il vérifiera enfin la lecture du volume versé à l'équivalence.

Tant que les ions permanganate sont en défaut, la solution est incolore. Il faut déterminer, à la goutte près, le volume de solution titrante permettant la persistance d'une coloration rose en solution : les ions permanganate sont alors en excès et l'équivalence vient d'être dépassée. Lors de la réalisation de l'expérience en l'absence de catalase, le volume équivalent déterminé est $V_{éq}$ = 18,0 mL, alors que pour la solution dans laquelle le comprimé de neutralisation a été immergé 15 minutes, ce volume équivalent est de l'ordre de 1 mL seulement.

**c.** Si $V_{éq}$ = 18,0 mL, d'après la relation donnée dans le document 4, $m_{H_2O_2} = \dfrac{5cV_{éq}M(H_2O_2)}{2}$

$$m_{H_2O_2} = \frac{5 \times 2,00.10^{-2} \times 18,0.10^{-3} \times 34,0}{2}$$
$$= 0,0306\,\text{g} = 30,6\,\text{mg}.$$

La masse $m'_{H_2O_2}$ contenue dans un volume 20,0 fois plus faible est donc $m'_{H_2O_2} = \dfrac{m_{H_2O_2}}{20,0}$

$$m'_{H_2O_2} = \frac{30,6}{20,0} = 1,53 \text{ mg}.$$

$m_{exp} = 20\,m'_{H_2O_2}$ car la solution S est 20 fois plus concentrée que S' donc $m_{exp}$ = 30,6 mg.

**d.** Soit $m_{réf}$ la masse de peroxyde d'hydrogène contenue dans 1,0 mL de solution S d'après la notice. Cette masse est la valeur de référence pour le calcul de l'écart relatif.

$$\text{écart relatif} = \frac{|m_{réf} - m_{exp}|}{m_{réf}}$$

$$\text{écart relatif} = \frac{|30,0 - 30,6|}{30,0} = 0,0200 = 2,00\ \%.$$

La valeur expérimentale trouvée ici est donc en bon accord avec les indications de la notice.

La solution est plus concentrée en peroxyde d'hydrogène dans le cas 1 que dans le cas 2 puisque le volume de solution titrante nécessaire pour atteindre l'équivalence est plus important.

**e.** La catalase a donc permis de diminuer la durée de la décomposition du peroxyde d'hydrogène. Le comprimé de neutralisation permet ainsi d'éliminer rapidement le peroxyde d'hydrogène utilisé pour désinfecter les lentilles, sachant que cette étape est indispensable pour pouvoir remettre les lentilles puisque le peroxyde d'hydrogène provoquerait des lésions oculaires (voir DOC 2).

### *Commentaire*

Pour la question **a.** la précision sur le facteur de dilution a été ici considérée avec deux chiffres significatifs, mais il est permis de considérer que c'est une valeur exacte.

## 8 Un appareil photo pour des mesures physiques (p. 582)

### *Objectif*

Cette activité expérimentale complète les autres activités concernant la diffraction et les interférences, en y ajoutant l'utilisation d'un appareil photo numérique et le traitement d'une image.

### *Correspondance avec le programme*

• Pratiquer une démarche expérimentale visant à étudier quantitativement le phénomène d'interférence dans le cas des ondes lumineuses ;

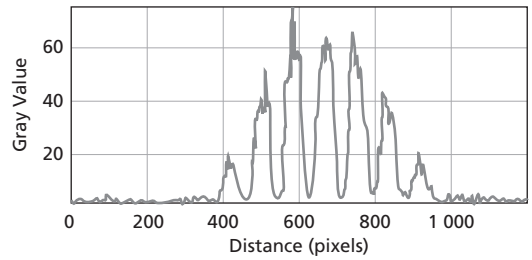
• Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un capteur (caméra ou appareil photo numériques par exemple) pour étudier un phénomène optique.

### *Liste de matériel*

Le matériel est identique à celui de l'activité 4 p. 527 du manuel de l'élève, en remplaçant la fente calibrée par des fentes d'Young calibrées

### *Corrigé*

**a.** Cette expérience est identique à celle de la diffraction du chapitre 21 page 527, en remplaçant diffraction par interférence. Les mêmes précautions expérimentales doivent être prises (saturation de l'image, réglage de l'échelle, de la netteté, lissage de la courbe). Se reporter au corrigé correspondant. On obtient, par exemple, le résultat suivant pour la figure d'interférences.




**b.** L'échelle obtenue est de 1 px pour $3,8.10^{-3}$ cm/px, l'incertitude de la mesure est le pixel à chaque extrémité de la mesure.

La mesure de 5 interfranges donne 1,55 cm, d'où l'interfrange $i = 0,31$ cm.

L'incertitude étant au pixel près, l'incertitude de mesure de $i$ est : $2 \times 0,0038 = 7,6.10^{-3}$ cm.

D'où $i = 0,31 \pm 0,008$ cm.

Il vient : $\lambda = \dfrac{ia}{D} = 6,2.10^{2}$ nm

Avec un laser à 632,8 nm, ce qui donne un écart relatif de 2 %.

Détermination de l'incertitude relative :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta i}{i} + \frac{\Delta a}{a} + \frac{\Delta D}{D} = 5\ \%$$

Ainsi la mesure obtenue s'écrit :
$\lambda = 6,2.10^{-7} \pm 0,3.10^{-7}$ m.

**c.** Afin d'améliorer la mesure, observons les différentes composantes de l'incertitude sur la mesure de $\lambda$.

Pour diminuer l'incertitude relative sur la mesure de $i$, il est possible d'augmenter la distance entre les fentes de Young et l'écran afin d'obtenir une figure de diffraction plus grande, donc une valeur d'interfrange plus élevée.

Pour diminuer $\Delta i$, il est aussi possible d'augmenter le nombre de pixels définissant l'image.

Les valeurs des fentes de Young sont fournies par le fabriquant des fentes, donc $a$ est un paramètre sur lequel il est difficile, de jouer à moins de remplacer par d'autres fentes dont l'incertitude relative est plus petite. Enfin, il est possible de diminuer l'incertitude sur la mesure de $D$ en augmentant $D$.

# BAC Exercices de synthèse

## 1 Absorption atmosphérique et observations atmosphériques

*Analyse de la question*

Les documents permettent de donner une interprétation de l'absorption des rayonnements par l'atmosphère en décrivant cette absorption **(Fig. 1)**, en donnant des pistes sur l'origine de cette absorption **(Fig. 2)** et en montrant comment un phénomène (Doppler, **Fig. 3**) bien analysé peut permettre une distinction des origines des rayonnements observés et absorbés ou non.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** L'astrophysique est soumise en partie à l'observation des objets célestes et des **rayonnements émis par ces objets.** Ces observations sont perturbées par **les interactions de l'atmosphère avec ces rayonnements**. Il est donc nécessaire de comprendre ces interactions pour que l'interprétation des observations ne soit pas erronée.

**2.** Description de rayonnements absorbés **(Fig. 1)** : un **trait touchant le sol indique qu'une part importante du rayonnement parvient sur Terre**. Plus le trait est court, plus le rayonnement est absorbé en altitude dans l'atmosphère. Les valeurs sur l'axe horizontal en haut du document sont **des longueurs d'onde**, en dessous sont indiqués **les domaines de longueur d'onde**. Les **couleurs sont mal choisies**, hormis pour la lumière visible, car les rayonnements X, gamma, radio ne sont pas visibles (le rouge et le violet peuvent être mal interprétés).

Les ondes radio et le rayonnement visible parviennent sur le sol, contrairement aux rayons X et gamma, à l'infra rouge et à l'ultraviolet qui restent en haute atmosphère.

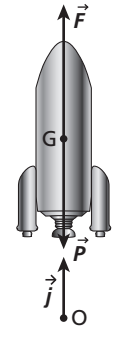
Il est **nécessaire d'utiliser des capteurs positionnés de manière adaptée** : par exemple, des satellites pour les rayons X et un télescope terrestre pour les ondes radio.

**3.** Le **document 2** analyse plus finement les absorptions des rayonnements IR, visible et UV en pointant **l'interaction des molécules d'eau et de $CO_2$ avec ces rayonnements.** On constate par exemple que les rayonnements dont la longueur d'onde est comprise entre 1 300 nm et 1 400 nm sont absorbés par l'atmosphère en raison de la présence de molécules d'eau. Le document donne donc une interprétation à l'absorption par l'atmosphère.

**4.** L'observation de raies d'absorption de la lumière émise par Jupiter fait apparaître des **raies horizontales et des raies inclinées**. **L'effet Doppler explique l'inclinaison des raies** pour Jupiter en rotation sur elle-même, une partie du rayonnement étant émise par des points qui se rapprochent de l'observateur alors qu'une autre partie est émise par des points qui s'en éloignent. Ces raies ne doivent pas être confondues avec les **raies horizontales dues à l'absorption atmosphérique terrestre** (raies telluriques), qui constituent une référence pour donner l'**échelle** du document.

La connaissance de l'effet Doppler et de l'existence de l'absorption atmosphérique permet une analyse juste du document.

## 2 Lancement d'un satellite météorologique




**1.a.** La fusée décolle si la force de poussée $F$ est supérieure au poids $P$.

**b.** La deuxième loi de Newton, appliquée au système {fusée}, donne, en projection sur le vecteur $\vec{j}$ :

$Ma = F - P$, donc $a = \dfrac{F}{M} - g$

car $P = Mg$.

**c.**

$$a = \frac{1{,}16.10^7}{7{,}3.10^5} - 10 = 1{,}6.10^{-1} \times 10^2 - 10$$

$$= 16 - 10 = 6 \text{ m.s}^{-2}.$$

**d.** Comme $a(t) = \dfrac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}(t)$, $v(t) = at + \text{constante}$.

La vitesse étant initialement nulle, la constante est nulle donc $v(t) = at = 6t$ m.s$^{-1}$.

**e.** Avec $v(t) = \dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}(t)$ on obtient

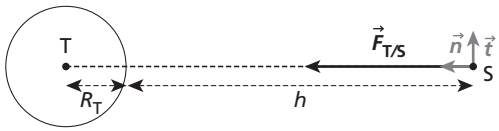
$y(t) = 3t^2 + \text{constante}$.

Comme $y = 0$ si $t = 0$, $y(t) = 3t^2$.

**f.** La distance $d$ parcourue à $t_1 = 6$ s est
$d = y(t_1) = 3t_1^2$
$d = 3 \times (6)^2 = 3 \times 36 = 108$ m.

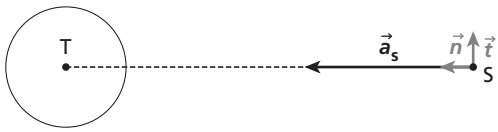
**g.** Ce sont les frottements, opposés au sens de déplacement de la fusée, qui expliquent que la distance parcourue soit en réalité plus faible.

**2.a.** $\vec{F}_{T/S} = \dfrac{GmM_T}{(R_T + h)^2}\vec{n}$




**b.** D'après la deuxième loi de Newton, $m\vec{a}_S = \vec{F}_{T/S}$, donc $\vec{a}_S = \dfrac{GM_T}{(R_T + h)^2}\vec{n}$.

**c.**




**d.** Le mouvement du satellite étant circulaire uniforme, $\vec{a}_S = \dfrac{v_S^2}{R_T + h}\vec{n}$.

En égalant les deux expressions :

$$\frac{GM_T}{(R_T + h)^2} = \frac{v_S^2}{R_T + h} \text{ donc } v_S = \sqrt{\frac{GM_T}{R_T + h}}$$

$$v_S = \sqrt{\frac{6{,}67.10^{-11} \times 6{,}0.10^{24}}{6{,}4.10^6 + 0{,}6.10^6}} = \sqrt{\frac{6{,}67 \times 6{,}0.10^{13}}{7{,}0.10^6}}$$

$$= \sqrt{\frac{4{,}0.10^1.10^{13}}{7{,}0.10^6}} = \sqrt{\frac{4{,}0.10^8}{7{,}0}} = 7{,}6.10^{-1} \times 10^4$$

$$= 7{,}6.10^3 \text{ m.s}^{-1}.$$

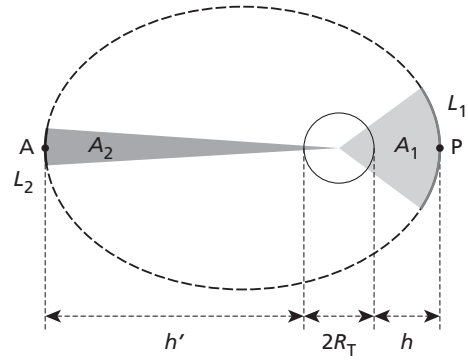
**e.** $T$ est la période de révolution du satellite, qui est reliée à sa vitesse par $v_S = \dfrac{2\pi(R_T + h)}{T}$,

donc $\sqrt{\dfrac{GM_T}{R_T + h}} = \dfrac{2\pi(R_T + h)}{T}$.

Ce qui donne $\dfrac{GM_T}{R_T + h} = \dfrac{4\pi^2(R_T + h)^2}{T^2}$,

soit $T^2 = \dfrac{4\pi^2(R_T + h)^3}{GM_T}$.

**3.a.** D'après la loi des aires, le rayon vecteur $\overrightarrow{TS}$ balaye des aires égales pendant des durées égales.




**b.** Le périgée P étant plus proche que l'apogée A, $L_1 > L_2$. Or les vitesses s'expriment selon $v_P = \dfrac{L_1}{\Delta t}$ et $v_A = \dfrac{L_2}{\Delta t}$, donc $v_P > v_A$. La vitesse est maximale au périgée et minimale à l'apogée.

**c.** $AP = 2R_T + h + h'$
$AP = 2 \times 6{,}4.10^6 + 6{,}0.10^5 + 3{,}6.10^7$
$= 12{,}8.10^6 + 6{,}0.10^5 + 3{,}6.10^7$
$= 1{,}28.10^7 + 0{,}06.10^7 + 3{,}6.10^7$
$= 4{,}9.10^7$ m

**d.** La durée du transfert entre A et P est égale à la moitié de la période, soit 5 heures et 21 minutes.

**e.** Le réacteur qui émet un jet de gaz permet d'augmenter la quantité de mouvement du satellite donc sa vitesse. En effet, la quantité de mouvement du gaz est dirigée vers l'arrière du satellite donc celui-ci voit sa quantité de mouvement augmenter dans le sens de son mouvement.

## 3 Étude de mouvements plans

**AFFIRMATION 1 :** vrai

L'application de la deuxième loi de Newton au système {projectile} dans le référentiel terrestre galiléen donne $\vec{P} = m\vec{a}$ (seul le poids intervient, les autres forces sont négligées) soit $m\vec{g} = m\vec{a}$ donc $\vec{a} = \vec{g}$.

Le mouvement a lieu à accélération constante, égale au champ de pesanteur terrestre. Le vecteur accélération $\vec{a}$ est donc indépendant des conditions initiales.

**AFFIRMATION 2 :** vrai

Dans le repère $(O,xz)$, le vecteur accélération $\vec{a}$ a donc pour coordonnées $\vec{a}\begin{cases} a_x = 0 \\ a_z = -g \end{cases}$

Par définition, $\vec{a} = \dfrac{d\vec{V}}{dt}$ donc $a_x = \dfrac{dV_x}{dt}$. En intégrant cette relation par rapport au temps, $V_x = C_1$ où $C_1$ est

une constante déterminée par la condition initiale de la vitesse.

À $t = 0$, $V_x(t=0) = V_0\cos(\alpha)$ donc $C_1 = V_0\cos(\alpha)$. Ainsi, à chaque instant, $V_x = V_0\cos(\alpha)$. La composante $V_x$ du vecteur vitesse $\vec{V}$ est donc constante.

**Affirmation 3 :** faux

Il suffit de considérer $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Dans ce cas, $V_x = 0$ et le mouvement n'a donc lieu que sur l'axe $(0z)$. La trajectoire n'est donc pas parabolique pour tout angle $\alpha$.

**Affirmation 4 :** vrai

$a_z = \frac{dv_z}{dt} = -g$. En intégrant cette relation par rapport au temps, $V_z = -gt + C_2$ où $C_2$ est une constante déterminée par la condition initiale de la vitesse. À $t = 0$, $V_z(t=0) = V_0\sin(\alpha)$ donc $C_2 = V_0\sin(\alpha)$.

Ainsi, à chaque instant, $V_z = -gt + V_0\sin(\alpha)$.

Or, $V_x = \frac{dx}{dt} = V_0\cos(\alpha)$.

En intégrant, $x = V_0\cos(\alpha)t + C_3$ où $C_3$ est une constante déterminée par la condition initiale de la position. À $t = 0$, $x(t=0) = 0$ donc $C_3 = 0$ et $x = V_0\cos(\alpha)t$.

De la même manière, $V_z = \frac{dz}{dt} = -gt + V_0\sin(\alpha)$. En intégrant, $z = -\frac{1}{2}gt^2 + V_0\sin(\alpha)t + C_4$ où $C_4$ est une constante déterminée par la condition initiale de la position. À $t = 0$, $z(t=0) = 0$ donc $C_4 = 0$ et $z = -\frac{1}{2}gt^2 + V_0\sin(\alpha)t$.

Or, pour un tir horizontal, $\alpha = 0$ donc $x = V_0t$ et $z = -\frac{1}{2}gt^2$. La portée est l'abscisse $x_P$ du point P pour lequel l'ordonnée $z_P$ vaut $-H$. Donc $-H = -\frac{1}{2}gt^2$ soit $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$. Donc $x_P = V_0t = V_0\sqrt{\frac{2H}{g}}$.

**Affirmation 5 :** vrai

Le système n'est soumis qu'à son poids, force conservative. L'énergie mécanique $E_m$ du projectile est donc constante lors du mouvement.

**Affirmation 6 :** vrai

Le travail du poids entre les points O et P est égal à $W_{OP}\left(\vec{P}\right) = mg(z_0 - z_P) = mgH$ car $z_P = -H$ et $z_0 = 0$.

Le travail est positif et proportionnel à la masse du projectile et à la hauteur $H$.

**Affirmation 7 :** vrai

L'énergie mécanique du système est conservée entre les points O et P :

$E_m(O) = E_m(P)$ donc $E_c(O) + E_{pp}(O) = E_c(P) + E_{pp}(P)$ soit $\frac{1}{2}mV_0^2 = \frac{1}{2}mV_P^2 - mgH$ en prenant l'origine comme référence d'énergie potentielle de pesanteur. Ainsi $V_P^2 = V_0^2 + 2gH$ donc $V_P = \sqrt{V_0^2 + 2gH}$.

**Affirmation 8 :** faux

Le système est soumis au poids et à la force de frottements non conservative donc l'énergie mécanique du système n'est pas conservée lors du mouvement. En utilisant le théorème de l'énergie mécanique, sa variation entre les points O et P est égale au travail entre O et P de la force de frottements $\vec{f}$ : $E_m(P) - E_m(O) = W_{OP}(\vec{f})$. Ce travail dépend du trajet pour aller de O à P. Il n'est égal à $-fH$ que si le trajet est vertical, c'est-à-dire si $\alpha = \pm\frac{\pi}{2}$.

**Affirmation 9 :** faux

La valeur $F$ de la force gravitationnelle existant entre la Terre et le satellite a pour expression $F = G\frac{M_T m}{(R_T + h)^2}$. En réalisant une analyse dimensionnelle sur $G$, il vient :

$[G] = \frac{[F]\times[R_T + h]^2}{[M_T]\times[m]} = \frac{MLT^{-2}\times L^2}{M^2}$ car $[F] = MLT^{-2}$ en utilisant la deuxième loi de Newton.

Donc $[G] = M^{-1}L^3T^{-2}$ : $G$ s'exprime en $kg^{-1}.m^3.s^{-2}$.

**Affirmation 10 :** faux

En appliquant la deuxième loi de Newton au satellite dans le référentiel géocentrique, galiléen, il vient : $m\vec{a} = -G\frac{M_T m}{(R_T + h)^2}\vec{u}$ avec $\vec{u}$ le vecteur unitaire dirigé du centre de la Terre vers celui du satellite.

Donc $\vec{a} = -G\frac{M_T}{(R_T + h)^2}\vec{u}$ : le vecteur accélération $\vec{a}$ n'est pas tangent à la trajectoire.

**Affirmation 11 :** vrai

Le vecteur accélération s'exprime par $\vec{a} = \frac{dV}{dt}\vec{u}_t + \frac{V^2}{R_T + h}\vec{u}_n$ dans le repère de Frénet.

D'après la deuxième loi de Newton, le vecteur accélération vaut $\vec{a} = -G\frac{M_T}{(R_T + h)^2}\vec{u} = G\frac{M_T}{(R_T + h)^2}\vec{u}_n$ car $\vec{u} = -\vec{u}_n$.

Par projection sur le vecteur $\vec{u}_n$ :

$$\frac{V^2}{R_T + h} = G\frac{M_T}{(R_T + h)^2} \text{ soit } V = \sqrt{\frac{GM_T}{(R_T + h)}}.$$

**AFFIRMATION 12 :** vrai

La période $T$ du satellite est égale à $T = \dfrac{2\pi(R_T + h)}{V}$.

En remplaçant $V$ par l'expression de la question précédente, il vient $T = \dfrac{2\pi(R_T + h)}{\sqrt{\dfrac{GM_T}{(R_T + h)}}} = \dfrac{2\pi(R_T + h)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{GM_T}}$.

Pour l'altitude $h = 12\,800$ km, la période $T$ vaut

$$T = \frac{2\pi(6{,}38.10^6 + 12{,}800.10^6)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{6{,}67.10^{-11} \times 5{,}98.10^{24}}} = 2{,}64.10^4 \text{ s}.$$

## 4 La lumière : onde ou particule ?

*Analyse de la question*

Il s'agit de décrire le phénomène de diffraction et le phénomène d'interférence en pointant similitudes et différences et de parler de la lumière en termes d'onde et de corpuscule en s'appuyant sur ces deux phénomènes.

Enfin, il faut proposer une modification des paramètres de ces expériences qui permette d'apporter des informations sur la dualité onde-corpuscule.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Le phénomène de diffraction met en évidence le **caractère ondulatoire de la lumière**. La compréhension des **taches de diffraction** séparées de zones sombres ne peut se faire qu'en considérant la lumière comme une onde. Ce phénomène est dû à l'existence **d'une fente** (ou d'un trou) de **largeur** peu différente de la **longueur d'onde de la lumière** utilisée.

**2.** L'expérience des interférences d'Young est basée sur **l'interférence de deux faisceaux** issus d'une **même source de lumière** mais traversant deux trous distincts. Cette expérience a renforcé l'interprétation ondulatoire de la lumière mais **l'approche corpusculaire** a été testée en diminuant le flux lumineux de telle manière que l'on puisse considérer que les fentes d'Young étaient bombardées **photon par photon**. Cela donne une accumulation d'impacts après les fentes et devrait aboutir à deux zones de fort impact, chacune située en face de chaque trou. Or, on constate que si l'on bombarde photon par photon mais avec un grand nombre de photons, **on retrouve les figures d'interférences d'Young** interprétables avec le modèle ondulatoire. On a donc ici une **expérience qui concilie les deux modèles et montre la dualité onde-corpuscule de la lumière**.

**3. La variation de la largeur des fentes et de la distance séparant les fentes d'Young** a une influence sur le résultat. Des fentes trop larges ou trop écartées auront pour conséquence de ne plus faire apparaître les interférences observées, ce qui rend **l'interprétation ondulatoire inadaptée**.

## 5 Microscope électronique à balayage

**1.a.** L'énergie acquise par l'électron sous l'effet de la force électrique est égale au travail de la force électrique subie par l'électron, de valeur absolue $eU_{AB}$.

**b.** Cette énergie est acquise sous forme cinétique donc l'énergie cinétique de l'électron à la sortie du canon est $E_c = eU_{AB}$.

**c.** La quantité de mouvement de l'électron est :

$$p = \sqrt{2m_e E_c} = \sqrt{2m_e eU_{AB}}.$$

**2.a.** Le domaine visible contient les radiations de longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 800 nm.

**b.** La diffraction en lumière visible permet d'étudier des objets dont les dimensions caractéristiques sont de l'ordre de grandeur de $10^2$ nm à $10^3$ nm. La microscopie électronique, elle, permet de régler la longueur d'onde des électrons (en fonction de leur vitesse), donc d'explorer des objets de tailles différentes, en particulier pour des tailles très inférieures à $10^2$ nm.

**c.** La longueur d'onde de de Broglie d'une particule vérifie la relation $\lambda = \dfrac{h}{p}$.

**d.** D'après la réponse à la question **1.c.**, cela donne $\lambda = \dfrac{h}{\sqrt{2m_e eU_{AB}}}$.

**e.** Pour une tension $U_{AB} = 1{,}00$ kV, cela donne :

$$\lambda = \frac{6{,}63.10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9{,}109.10^{-31} \times 1{,}602.10^{-19} \times 1{,}00.10^3}}.$$

$$= 3{,}88.10^{-11} \text{ m}$$

**3.a.** Lorsque le faisceau est projeté sur un écran, cela s'apparente à la microscopie optique classique.

**b.** L'utilisation de la figure de diffraction relève du caractère ondulatoire de l'électron.

**c.** L'électron peut également interagir de manière électrique avec la matière. Il est donc possible d'observer les déviations de l'électron du fait des interactions électriques.

**4.a.** Comme $\lambda$ est inversement proportionnelle à la racine carrée de la tension $U_{AB}$, il faut augmenter $U_{AB}$ pour diminuer $\lambda$.

**b.** La longueur d'onde de cet électron est :

$$\lambda = \frac{6{,}63.10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9{,}109.10^{-31} \times 1{,}602.10^{-19} \times 400.10^{3}}}.$$

$$= 1{,}94.10^{-12} \text{ m}$$

**c.** Sa quantité de mouvement est $p = \frac{h}{\lambda}$ soit :

$p = 3{,}42.10^{-22}$ kg.m.s$^{-2}$

Donc sa vitesse a pour valeur $v = \frac{p}{m_e}$ soit :

$v = 3{,}75.10^{8}$ m.s$^{-1}$.

**d.** Ce résultat est impossible : l'électron ne peut aller plus vite que la lumière. L'hypothèse d'un électron non relativiste n'est pas valable et les expressions utilisées ne sont pas dans leur domaine de validité.

## 6 Le projet Pharao

*Analyse de la question*

Il s'agit d'expliquer le texte du **document 1** décrivant le projet Pharao, qui consiste à mettre en orbite une horloge atomique à atomes froids. Le texte commence par vanter la stabilité de l'horloge, puis explique son fonctionnement et enfin évoque son intérêt. La question propose de détailler ces deux derniers points, en s'appuyant également sur les connaissances du programme du cycle terminal et sur le **document 2**, qui explique de manière illustrée le principe du refroidissement des atomes par laser. Le plan du texte peut simplement s'appuyer sur ces propositions.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1.** Introduire en expliquant brièvement l'intérêt de la recherche de **précision** dans la mesure du temps : vérification des lois physiques, besoins en **métrologie** (exemple du **GPS**).

**2.** Préciser que les **horloges atomiques** utilisent comme référence une **transition atomique** qui est **stable dans le temps** car l'atome ne s'use pas (différence avec les autres types d'horloges).

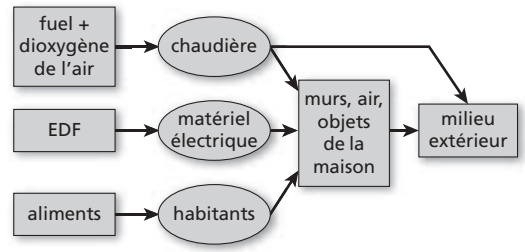
**3.** Néanmoins, si les atomes sont en **mouvement**, l'**effet Doppler** crée des variations sur les **fréquences** des radiations de référence. Il faut donc les immobiliser pour contrôler au mieux ces variations.

**4.** Le **refroidissement par laser** des atomes consiste à diminuer la quantité de mouvement de l'atome en lui faisant **absorber** un **photon** issu du laser.

**5.** En outre, placer cette horloge dans une station spatiale permet qu'elle soit soumise à une très faible **force gravitationnelle** de la part des astres l'entourant : cela diminue également la vitesse des atomes.

## 7 Bâtiment basse consommation

**I.a.**




**b.** Le transfert d'énergie entre le mur et le milieu extérieur est le plus impacté par le type d'isolation utilisé pour la construction du bâtiment.

**c.** La résistance thermique de l'isolation est :

$$R_{th} = \frac{r}{S} = \frac{e}{S\lambda}$$

$$R_{th} = \frac{0{,}30}{0{,}040 \times 120} = 0{,}063 \text{ K.W}^{-1}.$$

**d.** La résistance thermique surfacique est proportionnelle à $e$ et inversement proportionnelle à la conductivité thermique du matériau. Le quotient des conductivités thermiques de la brique et de la paille est $\frac{\lambda_{brique}}{\lambda_{paille}} = \frac{0{,}84}{0{,}040} = 21$. Pour avoir la même isolation, l'épaisseur de brique devra donc être 21 fois plus grande que celle du mur en paille, soit $21 \times 0{,}30 = 6{,}3$ m. De même, $\frac{\lambda_{bois}}{\lambda_{paille}} = \frac{0{,}16}{0{,}040} = 4{,}0$ : il faudrait une épaisseur de bois de $4 \times 0{,}30 = 1{,}2$ m.

**II.a.** Soit $\Delta t$ la durée de fonctionnement : l'énergie fournie à la pièce pendant cette durée est $E = P_{rad}\Delta t$

$E = 1\,000 \times 2{,}5 = 2{,}5$ kWh.

**b.** L'énergie est reçue par les radiateurs par conduction, l'eau étant en contact avec la partie métallique des radiateurs.

**c.** L'énergie est transférée dans un premier temps par conduction (contact entre le métal du radiateur et l'air) puis se propage dans l'air de la pièce par convection. Le transfert par rayonnement peut aussi être évoqué, il dépend en particulier du type de radiateur électrique utilisé.

**d.** Toute l'énergie transférée des radiateurs à l'air de la pièce a été transférée à l'extérieur par les fenêtres, les portes, les murs…

**e.** La consommation d'énergie pour cette pièce est donc de 2,5 kWh pour 5 heures.

Pour une année, cela donnerait une consommation de $\frac{2{,}5\times(365\times24)}{5}=4{,}4.10^3$ kWh. La pièce a une superficie de 12 m$^2$, donc la consommation surfacique annuelle est $\frac{4{,}4.10^3}{12}=3{,}7.10^2$ kWh par an et par m$^2$. Cela est bien supérieur aux 50 kWh.an$^{-1}$.m$^{-2}$, c'est-à-dire à la limite imposée par la réglementation thermique.

**f.** Néanmoins, sur une année entière, cette maison peut respecter la réglementation en prenant en compte les périodes non chauffées (été en particulier).

**III.1.a.** Une partie de l'énergie interne de l'eau chaude est transférée aux radiateurs tout au long du circuit ainsi qu'aux différents tuyaux.

**b.** L'eau entre à 25 °C dans la chaudière et ressort à 60 °C donc il y a une variation de température $\Delta\theta = 35$ °C.

La variation d'énergie interne $\Delta U$ d'un litre d'eau (de masse $m = 1{,}0$ kg) de capacité thermique massique $c_{eau}$ dans la chaudière vaut donc :

$\Delta U = mc_{eau}\Delta\theta$

$\Delta U = 1{,}0\times4{,}18.10^3\times35 = 1{,}5.10^5$ J.

**c.** Le rendement $r$ de la chaudière vaut 93 %. Or, il est défini par la relation :

$$r=\frac{\text{énergie consommée par la chaudière}}{\text{énergie transférée à l'eau}}.$$

Donc l'énergie consommée par la chaudière pour chauffer un litre d'eau vaut $\frac{1{,}5.10^5}{0{,}93}=1{,}6.10^5$ J.

**2.a.** Le flux thermique total est $\Phi=\frac{Q_{pertes}}{\tau}$

$\Phi=\frac{50.10^3}{30\times60}=28$ W.

**b.** La consommation est donc de 50 kJ pour 30 minutes et pour 10 m$^2$ soit 5 kJ pour 30 minutes par m$^2$ donc :

$$\frac{50\times365\times24\times60}{30}=8{,}8.10^5 \text{ kJ}$$

soit $\frac{8{,}8.10^5}{3600}=2{,}4.102$ kWh par an et par m$^2$.

Là encore, la réglementation évaluée sur 30 minutes n'est pas respectée mais peut l'être sur l'année en prenant en compte les périodes non chauffées.

**IV.**

*Analyse de la question*

Diminuer la consommation énergétique d'une habitation implique de traiter la diminution de l'apport d'énergie et la diminution des pertes d'énergies.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**a.** Pour diminuer les apports énergétiques, il est possible de **diminuer la température attendue** dans une pièce (chauffer à 19 °C au lieu de 20 °C par exemple). Cette démarche atteint vite ses limites en termes de confort. Il est aussi possible d'obtenir le même confort mais en utilisant des **systèmes de chauffage de meilleur rendement.**

**b.** La seconde possibilité est de réduire les pertes énergétiques. Cet exercice propose par exemple de faire appel à **une isolation** par la paille de **conductivité thermique plus faible** que la brique ou le bois. Ainsi, les transferts d'énergie vers l'extérieur de la maison se font plus difficilement. Il est aussi possible, avec un même matériau, d'augmenter **l'épaisseur de l'isolation**, la **résistance thermique surfacique étant proportionnelle à cette épaisseur**.

## 8 Transports et enjeux énergétiques

*Analyse de la question*

Il est attendu dans la réponse une différenciation des modes de transports en termes de pollution, en particulier au dioxyde de carbone dont des pistes de valorisation devront être données. Il faudra aussi souligner la difficulté de comparer ces moyens de transport à l'aide des données fournies.

*Pistes de réponses et mots-clés*

**1. Diminuer la production de dioxyde de carbone** lors du transport de marchandises implique de délaisser les modes de transport classiques routiers pour des modes de transports alternatifs (ferroviaires et fluviaux). Le **document 1** montre en effet que pour **transporter une tonne de marchandises en consommant 1 L de carburant** (ou l'équivalent en énergie d'origine électrique pour le train) le bateau peut parcourir 1,5 fois plus de **distance** que le train et plus de 3 fois la distance parcourue par un camion.

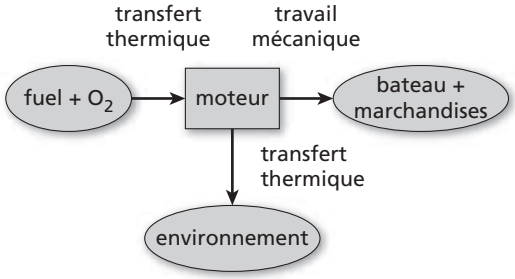
**2.** Évoquer les **aspects purement pratiques** (le bateau ne se déplace que sur les mers et le train nécessite une infrastructure qui est moins développée que le réseau routier).

**3.** Le **document 2** incite aussi à prendre en compte des critères de rapidité et de **pollution au $CO_2$**. Le train en France étant principalement électrique et **l'électricité étant à 75 % d'origine nucléaire**, la pollution au $CO_2$ lors du transport est beaucoup plus faible (chaîne énergétique 3 écrite pour de l'énergie électrique provenant de centrales nucléaires). En revanche, le bateau et le camion produisent du $CO_2$ pour le transport. Les hydrocarbures étant de nature différente pour ces modes de transport, une **comparaison simple** de la quantité de $CO_2$ produite par tonne de marchandise et par kilomètre parcouru n'est **pas** *a priori* **aisée** (chaînes énergétiques 1 et 2).

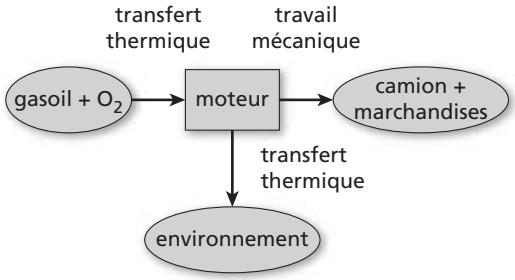
**d.** La valorisation du $CO_2$ est possible si celui-ci est récupérable, ce qui n'est pas le cas pour le bateau et le camion mais l'est pour le train, le $CO_2$ produit l'étant au niveau des centrales lors de la production de l'électricité. Citer des valorisations possibles du $CO_2$ comme son **utilisation comme solvant**, son utilisation pour la culture intensive de micro-algues ou dans les **filtres anti-poussière** pour filtrer les fumées.

**e.** En conclusion, pointer par exemple les atouts des trois moyens de transport (le train pour sa rapidité et sa moindre production de $CO_2$, le camion pour sa capacité à desservir à peu près tous les lieux bien qu'il soit un gros pollueur et le bateau pour sa sobriété malgré les contraintes lourdes en terme de logistique).

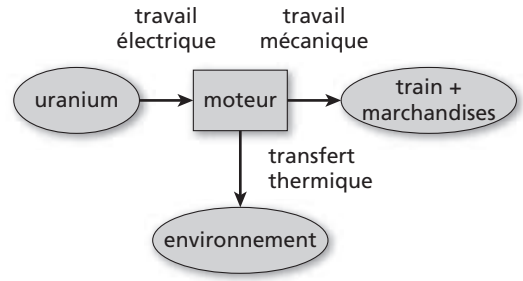
**Chaîne énergétique 1 :** bateau




**Chaîne énergétique 2 :** camion




**Chaîne énergétique 3 :** train




## 9 La masse des astronautes

**I.1.a.** L'énergie mécanique s'écrit $E_m = E_c + E_{pp} + E_{pe}$ où $E_c$ est l'énergie cinétique du système, soit :

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 + 0 + \frac{1}{2}kx^2.$$

**b.** À l'instant initial, la vitesse $v$ est nulle donc l'énergie cinétique l'est aussi. La courbe **a** représente donc $E_c$.
À l'instant initial, l'élongation $x$ est maximale donc l'énergie potentielle élastique $E_{pe}$ l'est aussi : la courbe **c** représente $E_{pe}$.
La courbe **b** correspond donc à $E_m$, somme de $E_c$ et de $E_{pe}$.

**c.** Ces courbes montrent que l'énergie mécanique est constante au cours du mouvement, ce qui ne serait pas le cas en présence de frottements.

**d.** La durée $T$ repérée par la double flèche correspond à une période pour $E_c$ et $E_{pe}$, c'est-à-dire à la durée entre deux positions d'équilibre du pendule. Elle est donc égale à la moitié de la période propre $T_0$ de l'oscillateur : $3T = 3\dfrac{T_0}{2} = 3{,}8$ s donc $T_{0,exp} = 2{,}5$ s.

**e.** $T_{0,attendue} = 2\pi\sqrt{\dfrac{m}{k}}$

$T_{0,attendue} = 2\pi\sqrt{\dfrac{100}{6{,}1.10^2}} = 2{,}5$ s.

**f.** $\left|\dfrac{T_{0,attendue} - T_{0,exp}}{T_{0,attendue}}\right| = 0{,}4\,\%$ en reprenant les valeurs affichées par la calculatrice pour $T_{0,attendue}$ et $T_{0,exp}$ (ou 0 % si on reprend les valeurs arrondies).
La valeur expérimentale est donc tout à fait acceptable.

**2.a.** La période propre de la chaise à vide est $T_1 = 2\pi\sqrt{\dfrac{m_1}{k}}$ si $m_1$ est la masse du siège.

La période propre de la chaise avec l'astronaute est $T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m_1 + M}{k}}$.

On en déduit le rapport $\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{m_1 + M}{m_1} = 1 + \frac{M}{m_1}$.

Donc $M = \left(\frac{T_2^2}{T_1^2} - 1\right) m_1$.

**b.** $M = \left(\frac{2{,}39^2}{1{,}28^2} - 1\right) \times 25{,}2 = 62{,}7$ kg.

**II.1.** Le nom « phosphatase alcaline » présente le suffixe *-ase* : il s'agit donc d'une enzyme.

**2.a.** La grandeur mesurée par un spectrophotomètre est l'absorbance $A$.

**b.** La longueur d'onde choisie lors d'un dosage spectrophotométrique correspond en général à un maximum de l'absorbance.

**c.** D'après la loi de Beer-Lambert, $A = kc$ où $k$ est une constante.

**d.** La courbe d'étalonnage est une droite passant par l'origine donc son équation est bien du type $A = kc$ avec $k$ constante.

**e.** Sur le graphe, l'abscisse correspondant à $A_1 = 0{,}520$ est $c_1 = 2{,}0$ mmol.L$^{-1}$.

**f.** $c_1$ est donc comprise entre

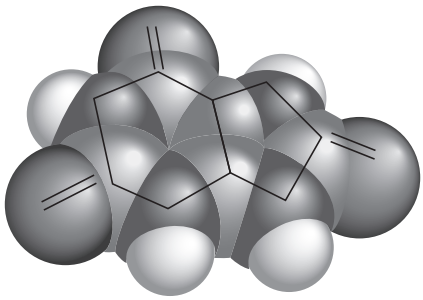
$2{,}0 - \frac{5{,}0}{100} \times 2{,}0 = 1{,}9$ mmol.L$^{-1}$

et $2{,}0 + \frac{5{,}0}{100} \times 2{,}0 = 2{,}1$ mmol.L$^{-1}$. L'intervalle de confiance est [1,9 mmol.L$^{-1}$ ; 2,1 mmol.L$^{-1}$].

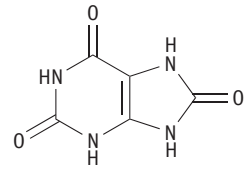
**g.** L'astronaute souffre de décalcification si la concentration en ions calcium dans son sang devient inférieure à 2,1 mmol.L$^{-1}$. En prenant en compte l'intervalle de confiance pour cette concentration, il n'est donc pas certain que l'astronaute souffre de décalcification.

## 10 Acide urique

**1.a.** Le modèle moléculaire peut être analysé ainsi, avec les principales liaisons chimiques indiquées :



La formule topologique s'en déduit :



Il s'en déduit également les conventions de couleur utilisées pour ce modèle moléculaire : gris pour C, bleu pour N, rouge pour O rouge et blanc pour H.

**b.** L'acide urique n'a qu'une seule conformation car aucune liaison simple C—C n'est libre de tourner.

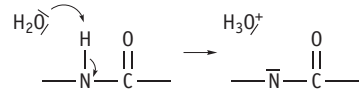
**c.** L'acide urique n'a pas de carbone asymétrique, il n'est donc pas chiral.

**d.** Le spectre montre trois signaux d'intensité 1/1/2, ce qui correspond aux quatre protons dont les deux qui sont portés par le cycle à 5 sont équivalents.

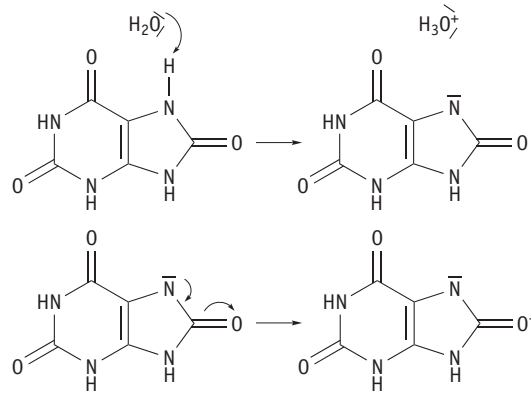
**e.** Les groupes caractéristiques de l'acide urique sont les liaisons C=O à 1 680 cm$^{-1}$, C=C à 1 580 cm$^{-1}$ et N—H à 3 450 cm$^{-1}$.

**2.a.** L'électronégativité de N ($\chi = 3{,}0$) et celle de O ($\chi = 3{,}4$) étant supérieures à celle de H ($\chi = 2{,}2$) les charges des atomes N et O sont $\delta^-$ et celle de H est $\delta^+$.

**b.** Sur le fragment du document 4, les flèches courbes sont :

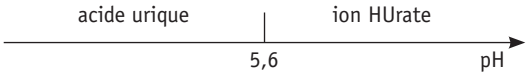


**c.** Pour montrer que le mécanisme écrit à la question précédente s'applique à l'acide urique, il faut le transférer à ce substrat. Cela donne :



**d.** $C_5H_4N_4O_3 + H_2O \rightleftharpoons C_5H_3N_4O_3^- + H_3O^+$. Au sens de Brönsted, l'ion HUrate est donc bien la base conjuguée de l'acide urique.

**e.** Diagramme de prédominance de l'acide urique, de $pK_a = 5,6$ :




Ce diagramme montre que dans le sang, à pH = 7,4, l'acide est sous forme d'ion HUrate (sa base conjuguée).

**f.** Formule brute Na $C_5H_4N_4O_3$. NaHUrate est constitué de l'ion HUrate qui porte une charge – et de l'ion sodium qui possède une charge +.

$Mg(HUrate)_2$ est constitué de deux ions HUrate portant une charge –. L'ion magnésium possède donc deux charges +.

**g.** $C_5H_4N_4O_3 + Na^+ + HO^- \rightarrow NaC_5H_3N_4O_3 + H_2O$

$2C_5H_4N_4O_3 + Mg^{2+} + 2HO^- \rightarrow Mg(C_5H_3N_4O_3)_2 + H_2O$

**3.a.** Dans l'eau froide : il faut 15 kg d'eau pour dissoudre 1,00 g d'acide urique ; la solubilité est donc $\frac{1,00}{15}$ soit 0,067 $g.kg^{-1}$ (il s'agit de grammes d'acide urique par kilogramme de solvant).

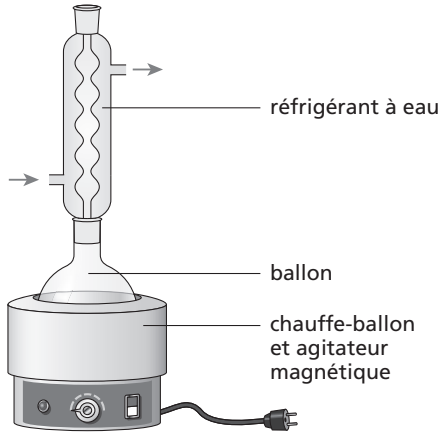
Dans l'eau chaude, c'est $\frac{1,00}{2,0} = 0,50\,g.kg^{-1}$.

**b.** La valeur 0,067 $g.kg^{-1}$ est proche de celle du tableau (60 $mg.dm^{-3}$ soit 60 $mg.L^{-1}$ ou approximativement 60 $mg.kg^{-1}$).

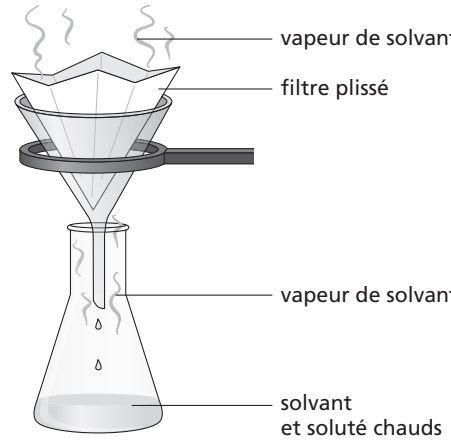
**c.** Le **document 9** indique qu'un solide peut être purifié par recristallisation s'il est plus soluble à chaud qu'à froid : c'est le cas de l'acide urique.

**d.**

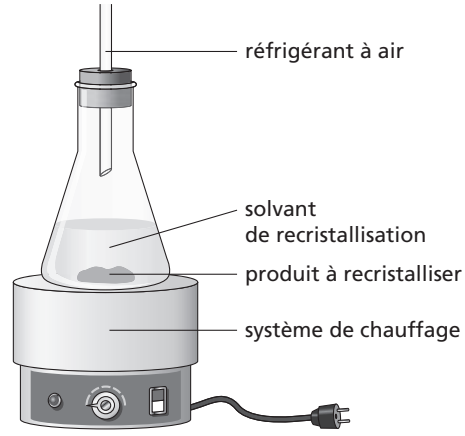
**① Chauffage à reflux**



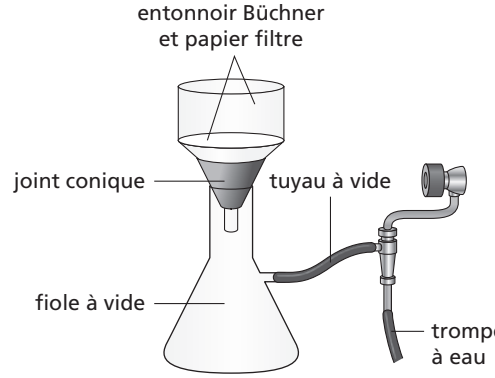

**② Filtration à chaud**




**③ Mise en solution du produit à recristalliser**



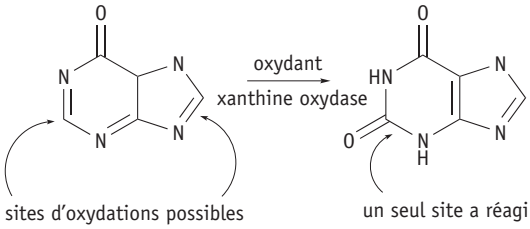

**④ Filtration sous vide**




Pour obtenir 10 g d'acide urique, il faut au moins $20 \times 2\,000$ g d'eau (c'est la quantité d'eau chaude pour dissoudre 10 g) soit 20 kg d'eau. Ce n'est pas réaliste au laboratoire.

**e.** Pour recristalliser 10 g d'urate de lithium, il faut seulement $10 \times 39 = 0{,}39$ kg d'eau, ce qui est accessible.

**4.a.** Le **document 9** montre qu'un CH de l'hypoxanthine s'est oxydé. Or, un autre site CH est également présent et pourrait donc s'oxyder. Il n'a pourtant pas été affecté par la réaction, ce qui prouve que l'oxydation est bien chimiosélective.




**b.** C'est une modification de groupe caractéristique, et non de chaîne.

**c.** Le nom *xanthine oxydase* indique que c'est une enzyme ; son rôle est donc d'être un catalyseur.

*Remarque* : la question **3.a.** d'apparence simple, n'est pas classique car les données sur la solubilité ne sont pas fournies comme habituellement en moles (ou grammes) par litre, mais en quantité de solvant pour dissoudre un gramme de composé.

## 11 Nitrophénol et CCM

**a.** La réaction des nitrophénols transforme un alcool en ester en présence de chlorure d'éthanoyle. Les différentes étapes sont commentées successivement.

• La réaction est lente et son évolution temporelle est suivie toutes les minutes en prélevant 0,5 mL et en arrêtant la réaction par introduction dans l'eau glacée (phénomène de trempe mettant à profit le facteur cinétique température).

• Dans l'eau glacée, le chlorure d'éthanoyle est détruit **(DOC 6)** alors que l'ester (qui est le produit de la réaction) n'est pas affecté **(DOC 6)**. Ainsi, même si le milieu réactionnel est ramené à température ambiante, la réaction de formation de l'ester ne pourra pas reprendre.

• La présence d'éther permet d'extraire l'ester car sa solubilité y est grande alors qu'elle est faible dans l'eau.

**b.** Les CCM montrent que la réaction chimique avec le 2-nitrophénol est plus lente que celle avec le 4-nitrophénol. En effet, les prélèvements 8 et 9 font encore apparaître du réactif 2-nitrophénol **(DOC 2)** alors que le **document 3** montre que le 4-nitrophénol a disparu dès le cinquième prélèvement.

**c.** Du point de vue du mécanisme, le carbone lié au chlore est $\delta^+$, vu l'électronégativité de C (2,2) et de Cl (3,2). Ce carbone peut donc être siège d'une attaque par l'atome O du phénol qui, à cause de son électronégativité, est $\delta^-$.

**d.** Pour comparer les hauteurs de migration sur les deux CCM, il faut considérer, comme le suggère le document 1, les liaisons que le substrat est susceptible d'établir avec le support. Le OH du 2-nitrophénol, établissant une liaison hydrogène intramoléculaire, est moins susceptible d'en établir une avec la silice du support de la CCM, alors que le OH du 4-nitrophénol, n'étant pas impliqué dans une liaison hydrogène intramoléculaire, en établira une avec la silice de la CCM. De ce fait, il montera moins haut que le 2-nitrophénol, ce qui est effectivement observé.

*Remarque* : les phénols s'estérifient d'autant moins facilement que la densité électronique sur le O est appauvrie par un groupement attracteur d'électrons, comme un $NO_2$ en position ortho ou para, d'où la nécessité d'utiliser un chlorure d'acide, particulièrement réactif.

## 12 Synthèse de la phénolphtaléine

**a.** La synthèse doit faire apparaître :

• le schéma d'un **chauffage à reflux** : légender la **verrerie**, indiquer les **réactifs** (masse et quantité de matière) et préciser que $H_2SO_4$ est un **catalyseur** puisque le protocole indique **qu'il est toujours présent à la fin de la réaction** ;

• l'addition de l'eau par le réfrigérant ;

• la filtration sur Büchner ;

• le calcul des quantités de matière (6,8 mmol d'anhydride et 13,8 mmol de phénol), soit la stœchiométrie 1 : 2.

**b.** Les pics des réactifs **(DOCS 2 et 3)** ne se retrouvent pas dans le spectre des cristaux **(DOC 4)** et les pics des cristaux produits sont nouveaux ; la synthèse a donc conduit à un produit différent des réactifs.

**c.** Mettre un peu de cristaux dans l'eau, la solution doit être incolore, ajouter une base forte (au-delà du pH donné dans le **document 5** : pH = 10,0) et la couleur doit devenir fuchsia.

**d.** Soit $x$ la masse de cristaux produits après séchage. Si 73 % correspond à $x$ g de cristaux produits après séchage, pour en avoir 10 g, il faut partir de

$\frac{10 \times 1{,}00}{x}$ g soit $\frac{10}{x}$ g d'anhydride et de $\frac{10 \times 1{,}30}{x}$ g, soit $\frac{13}{x}$ g de phénol.

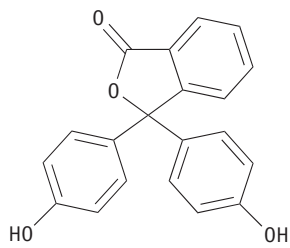
*Remarques :*

• L'utilisation des spectres RMN ne nécessite pas toujours une analyse complète des signaux ; la présence et l'absence d'un pic, comme en IR, est une information simple mais utile, et parfois suffisante.

• Le **document 2** est le spectre des 4 H du noyau aromatique. L'interprétation de la multiplicité de ces signaux n'est pas du niveau de Terminale. Il faut juste utiliser l'information de l'intégration et ignorer les informations sur la multiplicité. La raison en est que dans le cours, seuls les pics couplés bien séparés sont traités. Ce n'est pas le cas ici où la différence de déplacement chimique entre les deux groupes de signaux est peu différente de leur couplage. C'est un système A2B2.

• Le **document 3** est également un spectre RMN pour lequel il suffit de prendre en compte l'intégration des signaux : 1H pour le H en para et 2H et 2H pour les H en ortho et en méta.

• Le spectre du **document 4** est celui de la phénolphtaléine.




Deux phényles sont identiques et correspondent aux deux groupes de signaux d'intégration 4H, et les 4 H restant correspondent au H du troisième cycle (les H en position 2 et 5 s'intègrent en 1H chacun, et les H en position 3 et 4 s'intègrent en 2H).

## 13 Ondes ultrasonores et une application

**1.a.** La courbe bleue représente le signal reçu par $R_2$ car son amplitude est plus faible que celle de la courbe rouge donc le récepteur correspondant à cette courbe bleue est le plus éloigné de l'émetteur.

**b.** La fréquence d'échantillonnage est de 10 MHz donc la période d'échantillonnage est de :

$$\frac{1}{10.10^6} = 1{,}0.10^{-7}\ \text{s} = 0{,}10\ \mu\text{s}.$$

**c.** La plus petite période mesurable si l'on veut 20 acquisitions minimum par période de signal mesuré est $20 \times 0{,}10 = 2{,}0$ µs.

**d.** La fréquence la plus élevée mesurable par ce système vaut donc $\frac{1}{2{,}0.10^{-6}} = 5{,}0.10^5$ Hz.

**e.** La fréquence la plus élevée mesurable par ce système est supérieure à la plus grande fréquence étudiée, ici 60 kHz. Le système utilisé est donc bien adapté.

**f.** Sur le graphe, deux périodes correspondent à 98 – 20 = 78 µs donc la période des ultrasons est de 39 µs. L'incertitude de mesure sur le document est $\Delta T = 1$ µs.

**g.** La grandeur en ordonnée est une tension et s'exprime en volts (V).

**h.** $f = \frac{1}{T}$

$$f = \frac{1}{39.10^{-6}} = 25{,}6.10^3\ \text{Hz} = 25{,}6\ \text{kHz}$$

$$\Delta f = f \times \frac{\Delta T}{T}$$

$$\Delta f = 25{,}6.10^3 \times \frac{1.10^{-6}}{39.10^{-6}} = 0{,}7.10^3\ \text{Hz}$$

Donc la valeur mesurée des ultrasons vaut $f = 25{,}6 \pm 0{,}7$ kHz.

**i.** L'incertitude sur $d'$ est $\Delta d' = 1$ mm étant donné qu'il y a une erreur de lecture de 0,5 mm de chaque côté.

**j.** La longueur d'onde est la distance parcourue par une onde pendant une période : $\lambda = vT$.

**k.** Les deux signaux étant en phase pour les positions $R_2$ et $R'_2$ et aucune position intermédiaire ne donnant les signaux en phase, on a $T = \tau$.

**l.** $d' - d = 14$ mm donc $\lambda = 14 \pm 1$ mm.

**m.** $v = \frac{\lambda}{T}$

$$v = \frac{14.10^{-3}}{39.10^{-6}} = 3{,}6.10^2\ \text{m.s}^{-1}$$

$$\Delta v = v \times \left( \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta T}{T} \right)$$

$$\Delta v = 3{,}6.10^2 \times \left( \frac{1.10^{-3}}{14.10^{-3}} + \frac{1.10^{-6}}{39.10^{-6}} \right) = 3.10^1\ \text{m.s}^{-1}$$

donc $v = 3{,}6.10^2 \pm 3.10^1$ m.s$^{-1}$.

**n.** Pour diminuer l'incertitude relative $\frac{\Delta d'}{d'}$, on déplace le récepteur de plusieurs longueurs d'onde (passage plusieurs fois de suite par la situation signaux en phase). Cela va diminuer $\Delta d'$ car cette incertitude sera divisée par le nombre de longueurs d'onde choisi alors que $d'$ ne changera pas de manière notable.

**2.a.** $P_2$ correspond au passage des ultrasons de l'hémisphère gauche dans l'hémisphère droit. $P_3$ correspond à la sortie de l'hémisphère droit.

**b.** Dans l'hémisphère gauche, la durée du parcours est $\Delta t_{gauche} = 150 - 10 = 140$ µs.
Dans l'hémisphère droit, elle vaut
$\Delta t_{droit} = 310 - 150 = 160$ µs.

**c.** Pour être perçues par le récepteur, les ondes sonores doivent effectuer un aller-retour donc la largeur $L_{droit}$ de l'hémisphère droit vérifie :
$2 \times L_{droit} = v\Delta t_{droit}$ donc $L_{droit} = \dfrac{v\Delta t_{droit}}{2}$

$$L_{droit} = \frac{1{,}5.10^3 \times 160.10^{-6}}{2} = 0{,}12 \text{ m.}$$

De même, la largeur $L_{gauche}$ de l'hémisphère gauche vérifie $2 \times L_{gauche} = v\Delta t_{gauche}$ donc $L_{gauche} = \dfrac{v\Delta t_{gauche}}{2}$

$$L_{gauche} = \frac{1{,}5.10^3 \times 140.10^{-6}}{2} = 0{,}11 \text{ m.}$$

## 14 Laser au quotidien

**1.a.** La fréquence est $\nu = \dfrac{c}{\lambda_{Blu\text{-}ray}}$

$$\nu = \frac{3{,}00.10^8}{405.10^{-9}} = 7{,}41.10^{14} \text{ Hz.}$$

**b.** Les lecteurs Blu-ray sont pourvus de lasers bleus, les lecteurs CD et DVD de lasers rouges. La longueur d'onde du bleu est inférieure à la longueur d'onde du rouge donc les lasers des lecteurs DVD ou CD ont une longueur d'onde supérieure à 405 nm.

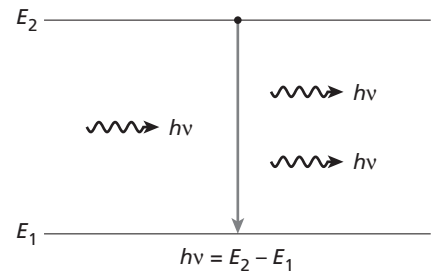
**c.** Le phénomène qui limite la taille du spot frappant le disque optique est la diffraction par la lentille focalisante.
Le diamètre du spot impose la taille limite des cuvettes (creux et plats).

**d.** D'après le schéma, la taille des cuvettes dépend de la longueur d'onde. Plus la longueur d'onde est petite, plus la taille des cuvettes est petite. La capacité de stockage est ainsi augmentée.
Si un laser ultraviolet était utilisé, sa longueur d'onde serait plus petite que celle du Blu-ray, ainsi les cuvettes seraient plus petites et la capacité de stockage augmentée.

**2.a.** Il y a émission d'un photon. L'énergie transportée par le photon est égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux $E_2$ et $E_1$ lors de la désexcitation.

**b.** Soit un atome excité dans un état d'énergie $E_2$. Sa désexcitation spontanée vers l'état d'énergie $E_1$ produit un photon d'énergie $E = E_2 - E_1$ associé à une radiation de fréquence $\nu$ telle que $E = h\nu$.

**Émission stimulée**




Si cet atome est soumis à un rayonnement incident, de même fréquence $\nu$, il peut subir une désexcitation stimulée. Dans ce cas, le photon émis a toujours la même énergie $E = h\nu$ mais de plus il est émis dans la même direction que le photon incident. Il s'agit d'une émission stimulée.

**c.** $E = h\dfrac{c}{\lambda}$

$$E = 6{,}63.10^{-34} \times \frac{3{,}00.10^8}{405.10^{-9}} = 4{,}91.10^{-19} \text{ J.}$$

Ainsi, $E = E_1 - E_2 = 4{,}91.10^{-19}$ J.

**3.a.** L'indice de réfraction s'exprime par la relation :

$$n = \frac{c}{v}.$$

**b.** La fréquence de la radiation du laser n'est pas modifiée lors du passage dans le polycarbonate.

**c.** La longueur d'onde de la radiation dans le polycarbonate est $\lambda = \dfrac{v}{f} = \dfrac{c}{nf} = \dfrac{1}{n} \times \dfrac{c}{f} = \dfrac{\lambda_C}{n}$ car $v = \dfrac{c}{n}$.

Ainsi, $\lambda = \dfrac{780}{1{,}55} = 5{,}03.10^2$ nm.

**d.** Pour qu'il y ait interférence destructive entre les deux faisceaux, il faut que la différence de marche soit $\dfrac{\lambda}{2}$.

**e.** La profondeur des creux doit donc être $\dfrac{\lambda}{4}$ car le faisceau lumineux effectue un aller-retour de $\dfrac{\lambda}{2}$ de plus sur le plat que sur le creux.

**f.** La profondeur dépend de la longueur d'onde. Elle est différente pour un DVD par rapport au Blu-ray car les deux disques optiques possèdent des lasers de longueurs d'onde différentes.

**4.a.** La surface utilisée par le disque est :
$S = S_2 - S_1 = \pi\left(r_2^2 - r_1^2\right)$ où $r_1$ est le rayon intérieur et $r_2$ le rayon extérieur.
Ainsi :
$S = \pi\left(\left(5{,}80.10^{-2}\right)^2 - \left(2{,}30.10^{-2}\right)^2\right) = 8{,}91.10^{-3}\,\text{m}^2$.

**b.** Le CD stocke 700 Mo = $700.10^6 \times 8 = 5{,}60.10^9$ bits. Sa densité est donc :
$d_{CD} = \dfrac{5{,}60.10^9}{8{,}91.10^{-3}} = 6{,}29.10^{11}\,\text{bit.m}^{-2}$.
Le DVD stocke 4,7 Go = $4{,}7.10^9 \times 8 = 3{,}76.10^{10}$ bits donc sa densité est :
$d_{DVD} = \dfrac{3{,}76.10^{10}}{8{,}91.10^{-3}} = 4{,}22.10^{12}\,\text{bit.m}^{-2}$
Enfin, le Blu-ray contient 25 Go = $25.10^9 \times 8 = 2{,}00.10^{11}$ bits. Sa densité est donc :
$d_{\text{Blu-ray}} = \dfrac{2{,}00.10^{11}}{8{,}91.10^{-3}} = 2{,}24.10^{13}\,\text{bit.m}^{-2}$.

**c.** Ce disque dur a une densité supérieure à celle du CD et du DVD mais une densité inférieure à celle du Blu-ray.

**d.** La densité augmente avec la diminution de la taille des cuvettes (creux et plats). Ceci permet d'augmenter la capacité des disques optiques.

## 15 Étude d'un phénomène optique par analyse photographique

**1.a.** D'après le graphique de la **figure 2**, le nombre de valeurs codant l'échelle de niveau de gris est de 256 (de 0 à 255). Donc $2^n = 256$, soit $n = 8$. Huit bits sont nécessaires à ce codage.

**b.** Par comparaison des **figures 1 et 2**, le niveau de gris correspondant à la valeur 255 est du blanc.

**c.** Une distance de 7,0 cm équivaut à 889 pixels. Un centimètre représente donc $\dfrac{889}{7{,}0} = 1{,}3.10^2$ pixels.

**d.** Par lecture graphique de la **figure 2**, la mesure de sept longueurs d'onde est de $7\lambda_1 = 7{,}2$ cm.
Donc $\lambda_1 = 1{,}0$ cm.

**e.** La célérité $v_1$ vaut $v_1 = \lambda f_1$
$v_1 = 1{,}0.10^{-2} \times 20 = 0{,}20\,\text{m.s}^{-1}$.

**f.** Pour une fréquence identique, en modifiant la forme de l'onde, la célérité est identique ($v_2 = v_1$). La célérité de l'onde est donc indépendante de la forme de l'onde.
Pour une onde identique, en modifiant la fréquence, la célérité est modifiée ($v_3 \neq v_1$).
La célérité de l'onde dépend donc de la fréquence (le milieu est dispersif).

**g.** En changeant deux paramètres simultanément, il n'est pas possible de connaître celui qui modifie la célérité. Il faut choisir de modifier un seul paramètre à la fois.

**2.a.** L'expérience de diffraction permet de mettre en évidence le caractère ondulatoire de la lumière.

**b.** La lumière laser est monochromatique et directionnelle ; la concentration spatiale et temporelle de l'énergie qu'elle transporte est grande.

**c.** En utilisant le graphique de la **figure 4** dont la largeur du lobe central est égale à la largeur de la tache centrale, cette dernière vaut 3,1 cm.
Donc la valeur de $d$ est $d = \dfrac{3{,}1}{2} = 1{,}6$ cm.

**d.** D'après la **figure 3**, $\tan\theta = \dfrac{d}{D}$ et $\tan\theta \approx \theta$ donc $\theta = \dfrac{d}{D}$, $\theta = \dfrac{1{,}6.10^{-2}}{3{,}00} = 5{,}3.10^{-3}$ rad.

**e.** L'écart angulaire s'écrit $\theta = \dfrac{\lambda}{a}$ avec $\theta$ exprimé en radians, $\lambda$ en mètres et $a$ en mètres.

**f.** La longueur d'onde vaut $\lambda = \theta a$
$\lambda = 5{,}3.10^{-3} \times 0{,}120.10^{-3} = 6{,}4.10^{-7}\,\text{m} = 6{,}4.10^2\,\text{nm}$.

**g.** En diminuant la longueur d'onde (pour une fente de même largeur), l'angle $\theta$ est plus petit ($\theta = \dfrac{\lambda}{a}$) donc $d$ diminue ($d = \theta D$).
En diminuant la largeur de la fente $a$ (pour une même longueur d'onde), l'angle $\theta$ est plus élevé ($\theta = \dfrac{\lambda}{a}$) donc $d$ augmente ($d = \theta D$).

## 16 Lanceur Ariane

**1.a.** La fusée évolue dans l'espace qui contient peu ou pas d'air (selon l'altitude) donc elle doit embarquer son comburant et son combustible.

**b.** La réaction équilibrée est
$$2N_2O_4 + C_2H_8N_2 \rightarrow 2CO_2 + 4H_2O + 3N_2.$$

**c.** La masse molaire de tétraoxyde d'azote est $M(N_2O_4) = 2 \times 14 + 4 \times 16 = 92\ \text{g.mol}^{-1}$. La quantité de matière présente avant le décollage est donc :
$$n(N_2O_4) = \frac{m(N_2O_4)}{M(N_2O_4)}$$
$$n(N_2O_4) = \frac{6{,}5.10^3}{9{,}2.10^{-2}} = 7{,}1.10^4\,\text{mol}.$$
D'après l'équation bilan, pour consommer totalement le tétraoxyde d'azote, il faut deux fois moins de diméthylhydrazine, soit $n(C_2H_8N_2) = \dfrac{n(N_2O_4)}{2} = 3{,}5.10^4$ mol.

**d.** La masse molaire de la diméthylhydrazine étant : $M(C_2H_8N_2) = 2\times12 + 8 + 2\times14 = 60$ g.mol$^{-1}$,
la masse de diméthylhydrazine est :
$m(C_2H_8N_2) = n(C_2H_8N_2)\times M(C_2H_8N_2)$
$m(C_2H_8N_2) = 3{,}5.10^4 \times 6.10^{-2} = 2{,}1.10^3$kg.
Il y a donc au total 2,1 + 6,5 = 8,6 tonnes dans les réservoirs.

**e.** Cette masse a été éjectée de la fusée à grande vitesse. Sa quantité de mouvement étant dirigée vers l'arrière de la fusée, celle de la fusée est dirigée vers l'avant.

**2.a.** Le travail de la force de poussée est $W = F \times z$
$W = 1{,}1.10^7 \times 60.10^3 = 6{,}6.10^{11}$ J.

La puissance des propulseurs est $P = \dfrac{W}{\Delta t}$

$P = \dfrac{6{,}6.10^{11}}{2\times3\,600 + 15\times60} = 8{,}2.10^7$ W soit 84 MW.

**b.** Immédiatement après le largage des propulseurs, la masse de la fusée est 750 – 540 = 210 tonnes, donc son énergie cinétique est $E_c = \dfrac{1}{2}mv^2$

$E_c = \dfrac{1}{2}\times210.10^3\times(240)^2 = 6{,}05.10^9$ J.

**c.** Son énergie potentielle est $E_p = mgz$
$E_p = 210.10^3 \times 9{,}8 \times 60.10^3 = 1{,}2.10^{11}$ J.

**d.** L'énergie mécanique est donc $E_m = E_c + E_p$
$E_m = 1{,}3.10^{11}$ J.

**e.** L'énergie de la fusée est inférieure à celle fournie par les propulseurs à cause des nombreuses pertes lors de la propulsion (frottements au départ avec l'air et surtout chaleur dégagée).

**3.a.** Il faut des ondes électromagnétiques, car elles peuvent se propager sans support matériel (il y a du vide dans l'espace !).

**b.** La propagation ne peut pas être guidée, étant donné les distances, donc le signal sera de plus en plus faible lorsque le module s'éloignera de la Terre.

**c.** Le signal ne sera pas absorbé dans l'espace car il n'y a pas de matière mais il peut être absorbé par l'atmosphère terrestre.

**d.** D'après le postulat de la relativité, la vitesse des impulsions est égale à $c$ dans le référentiel du module et dans le référentiel de la base.

**e.** La période $T_0$ est mesurée dans le référentiel d'émission des impulsions, c'est donc une période propre. Sur Terre, cette période sera supérieure car les impulsions ne sont pas émises dans le référentiel terrestre.

**f.** La période $T$ mesurée sur Terre est $T = \dfrac{T_0}{\sqrt{1-\left(\dfrac{v}{c}\right)^2}}$

$T = \dfrac{1}{\sqrt{1-\left(\dfrac{2.10^8}{3.10^8}\right)^2}} = 1{,}34$ s.