

programme 2012

physique chimie ^{1^{er}} ^{spécialité}

Xavier Bataille
Professeur au lycée Pierre-Gilles de Gennes-ENCPB, Paris

Caroline Bazot
Professeur au lycée Pierre-Gilles de Gennes-ENCPB, Paris

Sylvie Berthelot
Professeur au lycée Saint-Exupéry, Fameck

Bertrand Coiffier
Lycée français de Düsseldorf, Allemagne

Ronan Feneux
Professeur à l'IUFM d'Alsace, Strasbourg

Vincent Golman
Professeur au lycée Gustave Eiffel, Cachan

Lionel Guérin
Professeur à l'École active bilingue Jeannine Manuel, Paris

Pascale Hervé
Professeur au lycée Lakanal, Sceaux

Patrick Kohl
Professeur au lycée Pierre-Gilles de Gennes-ENCPB, Paris

Jean Lamerenx
Professeur au lycée Marcelin Berthelot, Saint-Maur-des-Fossés

Marie-Thérèse Lehoucq
Professeur au lycée Victor Duruy, Paris

Cyril Louault
Professeur au lycée Jean Jaurès, Montreuil

Olivier Ménard
Professeur au lycée Saint-François de Sales, Gien

Hélène Perrin
Professeur à l'École nationale supérieure Louis Lumière,
Noisy-le-Grand

Renaud Skrzypek
Professeur au lycée Buffon, Paris

Franck Teissier
Enseignant à l'Itemm, Le Mans

Julien Valentin
Professeur au lycée Marcelin Berthelot, Saint-Maur-des-Fossés.

Bjorn Zajac
Professeur à l'École active bilingue Jeannine Manuel, Paris

Céline Zajac
Professeur au lycée International de Saint-Germain-en-Laye

Avant-propos

Ce livre du professeur de physique-chimie T^{erm} S spécialité reprend les 12 chapitres du livre de l'élève.

Pour chaque chapitre, vous trouverez :

- les mots-clés du programme officiel (BO spécial n° 8, 13 octobre 2011), ainsi que les compétences de l'enseignement spécifique réinvesties dans le chapitre ;
- le choix pédagogique des auteurs concernant les contenus et la progression (« La démarche adoptée dans le manuel ») ;
- les réponses aux activités proposées en ouverture de chapitre (Vérifier ses acquis, S'interroger, question d'introduction) ;
- des commentaires sur les activités expérimentales, documentaires et d'investigation : les options pédagogiques, des détails pratiques pour le déroulement de la séance en classe et la réalisation des expériences ;
- les réponses aux questions des activités ;
- des propositions concernant le déroulement du cours et des activités ;
- les corrigés des exercices non résolus dans le manuel de l'élève ;
- une bibliographie succincte.

Pour certains chapitres des exercices ou des activités complémentaires sont disponibles sur www.libtheque.fr/physiquechimie.lycee.

Nous avons conçu le manuel de l'élève dans le plus grand souci de fidélité à l'esprit des nouveaux programmes. La résolution de problèmes scientifiques et l'approche par compétences y sont particulièrement développées.

Le contenu des « Bilans » a été structuré et conçu dans l'esprit d'une découverte par mots-clés. Chaque chapitre a été réfléchi de façon à ce que les élèves ne butent pas sur des difficultés mathématiques ou conceptuelles. Notons que l'ensemble de ce manuel a été rédigé dans l'optique d'une préparation optimale du baccalauréat.

L'avis de nos collègues nous étant précieux, n'hésitez pas à nous faire part de vos remarques concernant cet ouvrage, en adressant un courrier au service scientifique des Éditions Belin ou par e-mail à l'adresse suivante : physique-chimie-lycee@editions-belin.fr.

Les Auteurs

Mise en page : Desk

Schémas : Corédoc

Couverture : ©Datakraft/AGE Fotostock

Avertissement. Toutes les références à des sites Internet présentées dans cet ouvrage ont été vérifiées attentivement à la date d'impression. Compte tenu de la volatilité des sites et du détournement possible de leur adresse, les éditions Belin ne peuvent en aucun cas être tenues pour responsables de leur évolution. Nous appelons donc chaque utilisateur à rester vigilant quant à leur utilisation.

Le code de la propriété intellectuelle n'autorise que « les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » [article L. 122-5] ; il autorise également les courtes citations effectuées dans un but d'exemple ou d'illustration. En revanche « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » [article L. 122-4]. La loi 95-4 du 3 janvier 1994 a confié au C.F.C. (Centre français de l'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris), l'exclusivité de la gestion du droit de reprographie. Toute photocopie d'œuvres protégées, exécutée sans son accord préalable, constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.



Sommaire

PARTIE I : L'EAU

Chapitre 1	L'eau, un acteur essentiel pour la planète	5
Chapitre 2	La pollution : surveillance et lutte	15
Chapitre 3	L'eau et ses ressources	24
Chapitre 4	Une énergie tirée de l'eau	33

PARTIE II : SON ET MUSIQUE

Chapitre 5	Les instruments de musique	42
Chapitre 6	Le son et son traitement	51
Chapitre 7	Les émetteurs et récepteurs sonores	59
Chapitre 8	Son et architecture	68

PARTIE III : MATÉRIAUX

Chapitre 9	Le cycle de vie des matériaux	77
Chapitre 10	Propriétés électriques des matériaux	87
Chapitre 11	Matériaux : des structures particulières	97
Chapitre 12	Les nouveaux matériaux	108

Corrigés des sujets Bac	116
--------------------------------	-----

Chapitre 1

L'EAU, UN ACTEUR ESSENTIEL POUR LA PLANÈTE

A. Programme

Thème 1 : L'eau

Domaine d'étude	Mots-clés
Eau et environnement	• Mers, océans • Climat • Traceurs chimiques • Érosion • Dissolution • Concrétion

Le premier thème du programme de spécialité, « L'eau », a été découpé en quatre chapitres : « L'eau, un acteur essentiel pour la planète », « La pollution : surveillance et lutte », « L'eau et ses ressources » et « Une énergie tirée de l'eau ». C'est donc dans le deuxième chapitre que nous avons choisi d'aborder les problématiques relatives à la pollution et aux pluies acides. Dans ce premier chapitre, le rôle capital de l'océan est mis en avant, dans la thématique générale du climat terrestre.

✓ Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties

- Reconnaître un acide, une base dans la théorie de Brönsted.
- Identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base connaissant le pH du milieu et le pK_A du couple.
- Reconnaître des espèces chirales à partir de leur représentation.
- Utiliser la représentation de Cram.
- Identifier les atomes de carbone asymétrique d'une molécule donnée.
- Maîtriser l'usage des chiffres significatifs et l'écriture scientifique. Associer l'incertitude à cette écriture.
- 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.
- 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.
- Rédiger une synthèse de documents pouvant porter sur les interactions entre la science et la société.

B. La démarche adoptée dans le manuel

Les activités proposées dans ce chapitre sont volontairement inspirées de l'océanographie, discipline récente, pluridisciplinaire et passionnante. L'océan ne peut être assimilé à une « gigantesque flaque d'eau ». Il présente une grande hétérogénéité, tant en surface qu'en profondeur. C'est un acteur fondamental dans la régulation climatique terrestre. En effet, l'océan occupe

une position centrale, en interaction avec l'atmosphère, la lithosphère et la biosphère. Enfin, les techniques mises en œuvre pour étudier l'océan font appel à des procédés diversifiés, du simple dosage jusqu'aux observations par satellites, en passant par les mesures isotopiques. Les activités proposées ici visent donc à découvrir quelques-unes des manifestations de l'océan.

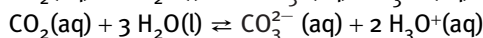
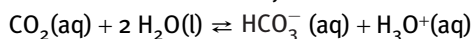
C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p. 10

✓ Réponses aux questions

– Deux isotopes possèdent le même nombre de protons (noté Z), mais un nombre de masse, noté A , différent. Par exemple, pour l'élément chimique carbone, il existe un isotope carbone 14 noté $^{14}_6\text{C}$ et un isotope carbone 12 noté $^{12}_6\text{C}$.

– La dissociation du dioxyde de carbone dans l'eau s'écrit :



– Pour convertir une concentration molaire ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) en une concentration massique ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), il faut rechercher la masse molaire de la substance ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$). La concentration molaire est alors égale à la concentration massique multipliée par la masse molaire.

– Un titrage conductimétrique consiste à déterminer la concentration d'une substance chimique en solution. L'équivalence et son volume correspondant sont détectés en repérant un changement dans l'évolution de la conductance de la solution à titrer lors de l'ajout de la solution titrante.

► S'interroger p. 10

La colonne d'eau est très hétérogène. Cette observation est valable pour les paramètres physiques (température, densité), mais aussi pour les paramètres chimiques (concentrations en dioxygène, en nitrates, en phosphates, etc.).

La distribution verticale de températures (en $^{\circ}\text{C}$) à l'Ouest de l'océan Atlantique est disponible (fig. 13) sur le site <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-courants-profonds.xml>

La distribution verticale des ions nitrate dans les trois océans (Atlantique, Pacifique et Indien) est disponible sur le site http://publishing.cdlib.org/ucpressebooks/view?docId=kt167nb66r&chunk.id=d3_3_cho7&toc.id=cho7&brand=eschol

Interprétation : les eaux de surface sont très pauvres en sels minéraux du fait du développement du phytoplancton qui consomme ces éléments.

► Introduction p. 11

La formation de la banquise au pôle Nord à la fin de la période estivale joue un rôle capital dans la circulation océanique. C'est un des moteurs de la circulation océanique thermohaline. L'eau de mer, lorsqu'elle se transforme en glace de mer, rejette une saumure qui contribue à augmenter la salinité et donc la densité de l'eau de mer. Cette dernière plonge alors en profondeur : c'est le début d'un long trajet au travers des trois océans.

► Activité 1 p. 12

Erratum : pour l'ordonnée du doc. 5, il faut lire : « Quantité de CO_2 atmosphérique (ppm) »

Cette activité expérimentale commence par l'étude d'une carte des flux de carbone afin de repérer les régions océaniques qui pompent du dioxyde de carbone et celles qui en relarguent.

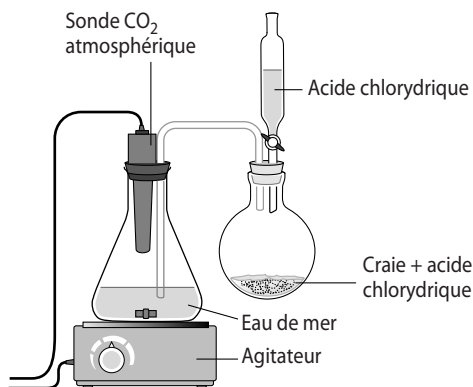
NB : les régions équatoriales émettent beaucoup de dioxyde de carbone en raison de la circulation océanique générale. En effet, dans les deux hémisphères, les vents dominants créent des courants océaniques de surface d'est en ouest et parallèles à l'équateur. Mais la force de Coriolis dévie ces courants océaniques de manière opposée dans les deux hémisphères. Ce phénomène génère alors une « perte » d'eau en surface au niveau équatorial qui est alors compensé par une remontée d'eau profonde riche en dioxyde de carbone : la zone océanique équatoriale relargue du dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Dans un second temps, l'élève doit concevoir un protocole expérimental à partir d'une liste de matériel proposée. Ce protocole après avoir été validé par le professeur (protocole monofactoriel, outil de mesure adapté, variable identifiée) sera mis en œuvre par l'élève.

Schéma du montage ci-contre (pour l'étude à basse température, le montage est identique, avec l'erenmeyer placé dans cristallisoir rempli de glace).

Matériel

- Eau de mer à $35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.
- 1 cristallisoir avec de la glace pilée.
- 2 Erlenmeyer de 500 mL avec turbulents.
- 2 agitateurs magnétiques.
- 2 sondes CO_2 atmosphérique (modèle Vernier) avec console Labquest pour l'enregistrement des données.
- 2 montages pour effervescence de la craie.
- Poudre de craie (2 fois 1 g).
- HCl à $0,1 \text{ M}$ (2 fois 10 mL).
- Pipette de 10 mL, éprouvette graduée de 250 mL.



✓ Réponses aux questions

1. Les régions de moyennes et hautes latitudes se comportent comme des puits de carbone : couleur violette ($24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ de carbone absorbé) et rose (de 36 à $108 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$ de carbone absorbé).

2. Protocole :

- Dans deux erlenmeyers de 500 mL, verser 250 mL d'eau de mer et ajouter un turbulent. Placer le premier erlenmeyer dans un cristallisoir rempli de glace : c'est la variable de l'expérience. Placer les erlenmeyers deux sur un agitateur.
- Dans chacun des montages annexes prévus pour réaliser l'effervescence de la craie, verser 1 g de poudre de craie. Fermer le bouchon. Verser 10 mL de $\text{HCl(aq)} 0,1 \text{ M}$ dans l'ampoule. Plonger le tuyau de dégagement de CO_2 dans l'eau de mer et mettre en place la sonde CO_2 (outil de mesure adapté au phénomène). Fermer hermétiquement les deux erlenmeyers. Verser l'acide chlorhydrique sur la craie pour réaliser le dégagement de CO_2 .

– Mesurer la concentration atmosphérique en CO_2 dans chaque erlenmeyer. La seule différence entre les deux montages est la température (protocole monofactoriel) : 20°C ou 0°C .

Les résultats expérimentaux sont donnés dans le doc. 3 du manuel.

4. Avec une eau à 20°C , la concentration maximale en CO_2 atmosphérique atteint $1\,300\text{ ppm}$. Avec une eau à 0°C , la concentration maximale en CO_2 atmosphérique atteint 900 ppm . Après $0,8\text{ h}$, la concentration en CO_2 atmosphérique est inférieure de 600 ppm avec une eau à 0°C . Une eau froide dissout donc davantage de CO_2 qu'une eau chaude. Ainsi, les eaux des hautes latitudes ont la capacité de pomper le CO_2 de l'atmosphère.

5. L'augmentation du CO_2 atmosphérique renforce l'effet de serre : la température de surface de la Terre augmente, ce qui réchauffe la surface des océans. L'efficacité des puits de carbone diminue, ce qui limite alors la capacité de l'océan à absorber nos rejets de CO_2 : l'effet de serre est alors amplifié.

NB : l'effet de serre est un phénomène physique stationnaire naturel. Sans effet de serre, la température moyenne de la surface terrestre serait d'environ -20°C . Avec l'effet de serre, elle est de 15°C environ.

Cet effet s'explique, en première approximation, par la présence d'une couche de gaz atmosphériques (H_2O , CO_2 , CH_4 , etc.) transparente au rayonnement solaire, mais qui absorbe une partie du rayonnement terrestre dans l'infrarouge. Cette énergie absorbée est réémise pour une moitié vers l'espace et pour l'autre moitié vers la surface terrestre.

En termes de bilan énergétique à la surface terrestre, les rayonnements conjoints du Soleil et de la couche de gaz atmosphériques portent la surface terrestre à une température moyenne plus élevée.

► Activité 2 p. 13

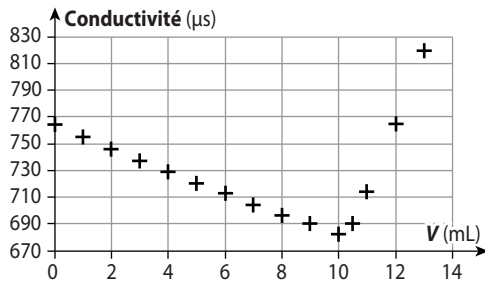
Cette activité d'investigation conduit les élèves à réaliser un titrage conductimétrique pour déterminer la salinité d'échantillons d'eau de mer. Dans un premier temps, les élèves découvrent la grande variabilité de la salinité de l'océan Atlantique. Dans un second temps, ils réalisent l'expérience afin de déterminer la salinité de deux échantillons d'eau de mer dont il faut retrouver l'origine.

Matériel

- Échantillons d'eau de mer à $31\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ et à $36\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.
- 1 pipette jaugée de 10 mL .
- 2 fioles jaugées de 100 mL .
- 1 éprouvette graduée de 100 mL .
- 1 burette graduée de $25,0\text{ mL}$.
- 1 agitateur et barreau aimanté.
- 1 bécher de 150 mL .
- 1 cellule de conductimétrie.
- 1 solution de nitrate d'argent $(5,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-2}\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

✓ Réponses aux questions

1. La salinité des eaux de Gulf Stream est voisine de $36\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ et celle des eaux du golfe du Saint-Laurent de l'ordre de $31\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.
2. Exemple de résultats obtenus avec échantillon d'eau de mer : courbe page suivante.



3. Volume à l'équivalence : $V_1 = 10,7 \text{ mL}$. $c_2 = \frac{c_1 V_1}{V_2} = \frac{5 \cdot 10^{-2} \times 10,7}{10} = 53,5 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Avec la dilution à 1/10, on trouve une concentration molaire en ions chlorure de $0,535 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

La concentration massique en ions chlorure est donc : $0,535 \times 35,5 = 19,0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

4. Valeur de la chlorinité : $\frac{19,0}{1,023} = 18,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Valeur de la salinité : $18,6 \times 1,80655 = 33,6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

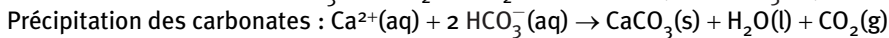
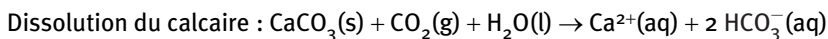
À l'aide de la carte du document 4 du manuel, on peut donc conclure que cet échantillon provient des eaux du golfe du Saint-Laurent.

► Activité 3 p. 14

Dans cette activité documentaire, les élèves sont amenés à établir un lien direct entre le climat de la Terre et l'érosion d'une chaîne de montagnes. Cette activité leur fait prendre conscience du cycle du carbone sur une échelle qui n'est pas celle de l'humain, mais celle de la Terre : sur plusieurs millions d'années, l'altération des roches silicatées pompe du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui contribue à refroidir la Terre.

✓ Réponses aux questions

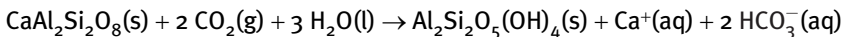
1. Bilan du carbone dans le cas de l'érosion continentale du calcaire suivie de la précipitation dans l'océan.



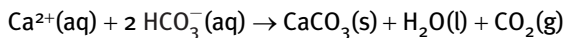
La dissolution consomme 1 mole de CO_2 , la précipitation en produit 1 mole. Le bilan est donc nul.

2. Bilan du carbone dans le cas de l'érosion continentale du basalte suivie de la précipitation dans l'océan.

Altération des silicates :



Précipitation des carbonates :



L'altération consomme 2 moles de CO_2 , la précipitation en produit 1 mole, le bilan est donc négatif : l'altération chimique des silicates consomme deux fois plus de dioxyde de carbone de l'atmosphère que la précipitation du calcaire n'en libère dans l'océan.

3. L'altération des silicates influence directement les variations de la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique. Sur l'échelle des temps géologiques, il faut donc considérer ce phénomène comme essentiel pour expliquer la diminution de la teneur en dioxyde de carbone atmosphérique. Le dioxyde de carbone atmosphérique se retrouve aujourd'hui « séquestré » dans le carbone lithosphérique (calcaire).

4. Chaîne de montagnes → érosion → altération des silicates = pompage de CO_2 → baisse du CO_2 atmosphérique → diminution de l'effet de serre → refroidissement de la température moyenne de la surface terrestre.

► Activité 4 p. 15

Cette activité documentaire vise à mettre en évidence, d'une part, l'existence de courants océaniques et, d'autre part, les méthodes mises en œuvre par les océanographes pour les caractériser. Dans un premier temps, les élèves réinvestissent les notions relatives à la radioactivité en étudiant le devenir du carbone 14 dans l'océan. Dans un second temps, des données chiffrées issues de cartes leur permettent de calculer la vitesse de ces courants océaniques.

✓ Réponses aux questions

1. Le carbone 14 présent dans les eaux océaniques est issu de l'atmosphère (origine anthropique ou naturelle). Les échanges entre l'atmosphère et l'océan permettent au carbone 14 de se dissoudre dans les eaux superficielles. Mais quand une masse d'eau plonge en profondeur, elle s'isole de l'interface atmosphérique et les échanges stoppent, on parle de la fermeture du système. Par désintégration radioactive, la quantité de ^{14}C diminue alors dans l'eau plus profonde.

2. Les eaux de surface plongent au niveau de l'Arctique. Ces eaux profondes parcourent alors l'Atlantique du nord vers le sud. Puis, autour de l'Antarctique, elles se dirigent du sud vers le nord dans les océans Indien et Pacifique.

3. Les eaux profondes de l'Atlantique sont passées de la latitude 60°N à 40°S en 400 ans.

Périmètre de la Terre : $P = 2\pi r$, soit $P = 2 \times 3,14 \times 6\,370\,000 = 40 \cdot 10^6 \text{ m}$.

Un arc méridien de 100° représente $40 \cdot 10^6 \times \frac{100}{360} = 11 \cdot 10^6 \text{ m}$.

La vitesse du courant profond dans l'Atlantique est donc de $11 \cdot 10^6 \text{ m}$ en 400 ans.

Résultat en $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$11 \cdot 10^6 \times 1\,000 \times \frac{1}{400} \times \frac{1}{360} \times \frac{1}{24} \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{60} = 0,88 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

4. Au niveau de l'équateur, les eaux profondes de l'Atlantique circulent de l'ouest vers l'est.

5. Au niveau équatorial, les eaux profondes de l'Atlantique (repère $0,05 \text{ pmol} \cdot \text{kg}^{-1}$) sont passées de la longitude -45° (en 1983) à -15° (en 1993) soit un déplacement de 30° en 10 ans.

Périmètre de la Terre à l'équateur : $P = 40 \cdot 10^6 \text{ m}$ (voir ci-dessus).

Un arc parallèle de 30° représente $40 \cdot 10^6 \times \frac{30}{360} = 3,3 \cdot 10^6 \text{ m}$.

La vitesse du courant profond équatorial dans l'Atlantique est donc de $3,3 \cdot 10^6 \text{ m}$ en 10 ans.

Résultat en $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$3,3 \cdot 10^6 \times 1\,000 \times \frac{1}{10} \times \frac{1}{360} \times \frac{1}{24} \times \frac{1}{60} \times \frac{1}{60} = 10,6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}.$$

6. La connaissance des courants océaniques permet de mieux comprendre les climats terrestres, de gérer les pollutions accidentelles, ou encore de rentabiliser les transports maritimes.

D. Déroulement du cours

Comme le programme l'indique, « *Le professeur privilégiera les activités ayant une dimension expérimentale* ». Plutôt que de proposer une séquence pédagogique chronologique, nous proposons d'établir une programmation annuelle de manière à répartir de façon équilibrée les trois types d'activités.

Activité expérimentale	Activités documentaires	Activité d'investigation
Activité 1 (rédaction d'un protocole expérimental)	Activité 3 • Activité 4	Activité 2 (réalisation d'un titrage conductimétrique)

E. Réponses aux exercices p. 18-19

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 205.

4 1. À l'aide d'une pipette jaugée de 5,00 mL (précision de 0,1 %) conditionnée avec la solution à diluer, introduire la solution mère dans une fiole jaugée de 500 mL (précision de 0,2 %) et compléter avec de l'eau désionisée jusqu'au trait de jauge. Boucher et agiter le contenu pour homogénéiser la solution.

2. a. La concentration molaire est donnée par

$$\text{la relation } c = \frac{\left(\frac{m}{M}\right)}{V}.$$

$$\text{Soit } c(\text{Ag}^+(\text{aq})) = (8,5/169,9)/0,500 \\ = 0,100058 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

(nombre brut sans arrondi significatif).

$$\text{b. } \frac{\Delta c(\text{Ag}^+(\text{aq}))}{c(\text{Ag}^+(\text{aq}))} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V}{V}\right)^2}$$

Soit $\Delta c(\text{Ag}^+(\text{aq}))$

$$= 0,100058 \times \sqrt{\left(\frac{0,1}{8,5}\right)^2 + 0 + (0,2 \%)^2} \\ = 0,001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{Donc } c(\text{Ag}^+(\text{aq})) = 0,100 \pm 0,001 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

3. D'après l'équation de dosage donnée, à l'équivalence : $n(\text{Ag}^+(\text{aq})) = n(\text{Cl}^-(\text{aq}))$. On en déduit :

$$c(\text{Cl}^-(\text{aq})) = c(\text{Ag}^+(\text{aq})) \frac{V_{\text{eq}}}{V_0} \\ = (0,10 \times 4,5)/50 \\ = 9,000 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

(nombre brut, sans arrondi significatif).

Calcul de l'incertitude associée :

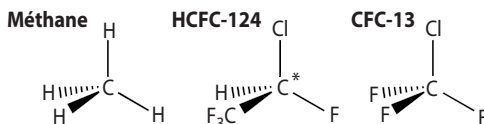
$$\Delta c(\text{Cl}^-(\text{aq})) = c(\text{Cl}^-(\text{aq}))$$

$$\sqrt{\left(\frac{\Delta c(\text{Ag}^+(\text{aq}))}{c(\text{Ag}^+(\text{aq}))}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{\text{eq}}}{V_{\text{eq}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_0}{V_0}\right)^2} \\ = 9,000 \cdot 10^{-3} \times \sqrt{\left(\frac{0,001}{0,100}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{4,5}\right)^2 + (0,1 \%)^2} \\ = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$\text{Donc } c(\text{Cl}^-(\text{aq})) = (9,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. La solution mère est 100 fois plus concentrée. La concentration massique est donnée par la relation $c_m(\text{Cl}^-(\text{aq})) = 100c(\text{Cl}^-(\text{aq}))M(\text{Cl}^-) = 100 \times 9,0 \cdot 10^{-3} \times 35,5 = 32 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

5 1. Seule la molécule HCFC-124 présente un carbone asymétrique, repéré ci-dessous par un astérisque.



2. D'après le tableau, le P_{RG} du HCFC-124 sur 20 ans est de 2 000, soit le même impact que 2 000 tonnes de CO_2 .

3. Sur 20 ans, 1 tonne de méthane libérée dans l'atmosphère à un impact équivalent à 62 tonnes de CO_2 . Sur 100 ans, la quantité de

méthane encore présente dans l'atmosphère sera plus faible comparativement au CO_2 , d'où la diminution du P_{RG} .

4. L'augmentation du P_{RG} indique au contraire une durée de vie dans l'atmosphère plus importante pour le CFC-13 que pour le CO_2 .

6 1. Les chiffres après le symbole « $\pm$ » indiquent l'incertitude sur la valeur numérique de la concentration.

2. Pour réaliser un titrage, le prélèvement d'eau de mer s'effectue à l'aide d'une pipette jaugée.

3. a. Le volume de solution titrante est mesuré à l'aide d'une burette graduée. L'incertitude la plus faible pour une mesure réalisée avec cette verrerie est de $\pm 0,1$ mL.

b. La solution de chromate de potassium est prélevée avec une pipette simple. Cette verrerie ne permet pas de réaliser de mesure de volume. On ne peut pas associer d'incertitude à la quantité de solution prélevée.

4. L'ion chromate est le réactif indicateur de fin de réaction titrante. Cette substance étant cancérigène, son utilisation comme réactif est aujourd'hui interdite dans les lycées.

7 1. L'acide carbonique H_2CO_3 et l'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- sont des composés

acides. L'ion hydrogénocarbonate HCO_3^- et l'ion carbonate CO_3^{2-} sont des composés basiques.

2. L'ion hydrogénocarbonate est un composé à la fois acide et basique. C'est un composé amphotère.

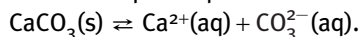
3. a. Les proportions sont les suivantes (en moles) : $p(\text{H}_2\text{CO}_3) = 0,6\%$;
 $p(\text{HCO}_3^-) = 88,2\%$;
 $p(\text{CO}_3^{2-}) = 11,2\%$.

b. $6,3 = pK_{A1} < \text{pH} < pK_{A2} = 10,3$. L'espèce prédominante est l'ion hydrogénocarbonate.

c. Avec une proportion proche de 90 %, l'ion hydrogénocarbonate est bien l'espèce prédominante.

8 1. $\text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{aq}) + \text{CO}_2(\text{aq}) \rightleftharpoons 2 \text{HCO}_3^-(\text{aq}) + \text{Ca}^{2+}(\text{aq})$.

2. Le calcaire est une roche très peu soluble dans l'eau. Cette dissolution peut tout de même se traduire par l'équation de réaction :



3. L'érosion des parois de la grotte détruit, dans le même temps, les peintures rupestres qui les recouvrent. La couverture végétale extérieure permet de limiter cette érosion en minimisant les infiltrations d'eau. L'agrandissement de l'ouverture de la grotte augmenterait l'apport en CO_2 , ce qui favoriserait l'érosion selon l'équation établie à la question 1.

F. Réponses aux sujets BAC p. 20-21

9 1. La solidification de l'eau ne se produit à 0°C que si elle est pure.

L'eau de mer contient des sels dissous, sa température de solidification est donc différente de 0°C .

2. D'après le doc. 3, la formation de la glace de mer provoque le rejet d'une eau plus salée. Le doc. 4 indique que la densité augmente avec la salinité. La densité de l'eau située sous la banquise a donc tendance à augmenter.

3. Dans le nord de l'océan Atlantique, la formation de la glace de mer provoque une aug-

mentation de la densité de l'eau de mer. Sous l'effet de la pesanteur, cette eau plus dense a tendance à plonger.

4. a. La salinité et la température de l'eau de mer sont plus importantes à proximité de Bordeaux ($34,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 12°C) que de Montréal ($31,5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 4°C).

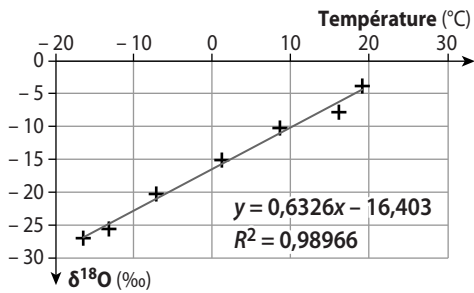
b. La différence constatée peut s'expliquer par l'existence d'un courant marin, le Gulf Stream, qui a tendance à déplacer des masses d'eau chaudes et salées de la zone tropicale de l'océan Atlantique ($37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 26°C) vers les côtes de l'Europe de l'Ouest.

5. Si l'hypothèse formulée à la question 4. b. est vérifiée, la disparition de la circulation thermohaline et plus particulièrement du Gulf Stream provoquerait un refroidissement de toute l'Europe de l'Ouest. En pratique, des courants atmosphériques expliquent également la douceur du climat en Europe de l'Ouest.

10 1. D'après le doc. 1, la proportion de $H_2^{18}O$ dans la vapeur d'eau formée au-dessus de l'océan est plus faible que dans l'eau de mer. La définition du $\delta^{18}O$ donnée dans le doc. 2 conduit ainsi à une valeur négative car $(H_2^{18}O/H_2^{16}O)_{\text{vapeur}} < (H_2^{18}O/H_2^{16}O)_{\text{eau de mer}}$.

2. Au cours de l'évaporation d'un mélange, la vapeur formée s'appauvrit en composé le moins volatile, ici $H_2^{18}O$. On en conclut que $H_2^{16}O$ est relativement plus volatile que $H_2^{18}O$.

3. a.



b. La modélisation indique que les points sont alignés sur une droite moyenne d'équation : $\delta^{18}O = 0,6326T - 16,403$.

4. D'après l'équation établie à la question 3. b, un $\delta^{18}O$ égal à $-43,3$ ‰ correspond à une température de $-42,5$ °C. La température au pôle devait être de l'ordre de -40 °C il y a 100 000 ans.

G. Épreuve expérimentale p. 22

1.1. D'après le doc. 1, la salinité totale s'élève à 45,7 g de sels par litre d'eau.

1.2. Le doc. 1 indique que le chlorure de sodium ne représente que 83 % de la salinité totale de l'eau de Badwater. L'hypothèse formulée par l'étudiant n'est donc pas vérifiée.

1.3. La préparation de 250 mL de solution nécessite la pesée d'une masse trop faible de NaCl pour être précise avec le matériel couramment disponible au laboratoire. À l'aide d'une balance précise au centigramme, peser dans un sabot une masse de 0,59 g de NaCl et introduire le solide pesé dans une fiole jaugée de 1 L. Rincer le sabot de pesée avec de l'eau désionisée, puis compléter la fiole jusqu'au trait de jauge. Boucher et agiter le contenu pour homogénéiser la solution.

2.2. La conductivité de la solution est de l'ordre de $1,5 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$.

3. Données nécessaires pour la modélisation :

Concentration $C_i \text{ (mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$	Conductivité $\sigma_i \text{ (mS} \cdot \text{cm}^{-1}\text{)}$
0,0010	0,17
0,0020	0,30
0,0025	0,37
0,0050	0,73
0,0060	0,87
0,0075	1,09
0,0100	1,46

La modélisation fournit une droite d'équation : $\sigma = 143,68C + 0,015$. L'ordonnée à l'origine étant faible comparativement aux conductivités mesurées, on peut conclure que la conductivité est proportionnelle à la concentration dans le domaine étudié.

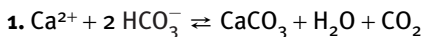
Technologie. La ruée vers le fer

1. Comme tous les végétaux, le phytoplancton marin participe activement au cycle du carbone. En effet, la photosynthèse (dans les chloroplastes) permet la fixation du dioxyde de carbone dans des molécules organiques grâce à l'énergie solaire.

2. Malheureusement le développement du phytoplancton peut être entravé par un certain nombre de facteurs limitants : c'est le cas de l'élément fer, très peu concentré dans les eaux superficielles aux hautes latitudes, surtout dans l'hémisphère sud. En effet, l'élément fer provient de l'altération des roches continentales, phénomène moindre dans cet hémisphère. Les chercheurs en géo-ingénierie ont voulu tester si en enrichissant ces eaux

oligotrophes, le phytoplancton pouvait se développer et donc stimuler la pompe biologique en dioxyde de carbone.

Les fontaines pétifiantes de Saint-Nectaire



2. Le phénomène de précipitation du carbonate de calcium à Saint-Nectaire provient des propriétés physico-chimiques des eaux de cette source : les eaux sont chaudes (52 °C) et riches en dioxyde de carbone. La sortie à l'air libre dans la grotte favorise donc le dégazage, propice à la précipitation. De plus, la teneur en carbonate de calcium élevée ($8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) fournit les éléments nécessaires à la précipitation du calcaire.

I. Bibliographie

- ✓ M. Roy Barman et C. Jeandel, *Géochimie marine : circulation océanique, cycle du carbone et changement climatique*, Vuibert, 2011.
- ✓ M. Rotaru, J. Gaillardet, M. Steinberg et J. Trichet, *Les climats passés de la Terre*, Vuibert, 2011.
- ✓ « Les océans, le nouveau monde de la chimie durable », *Pour la Science*, dossier n° 73, oct.-déc. 2011.
- ✓ Lien entre le CO_2 et la production de carbonates : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-co2-et-carbonates.xml>
- ✓ Utilisation des traceurs : <http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-courants-profonds.xml>
- ✓ Sites généralistes sur l'observation des océans : www.aviso.oceanobs.com/fr/accueil/index.html
www.ifremer.fr/lpo/cours/

Chapitre 2

LA POLLUTION : SURVEILLANCE ET LUTTE

A. Le programme

Thème 1 : L'eau

Domaine d'étude	Mots-clés
Eau et environnement	• Surveillance et lutte physico-chimique contre les pollutions • Pluies acides

✓ Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties

- Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce à l'aide de courbes d'étalonnage en utilisant la spectrophotométrie et la conductimétrie, dans le domaine de la santé, de l'environnement ou du contrôle de la qualité
- 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.
- Identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base connaissant le pH du milieu et le pK_A du couple.

B. La démarche adoptée dans le manuel

La démarche adoptée dans ce chapitre consiste à exploiter les compétences acquises en chimie en classe de 1^{re} S et en classe de Term S (enseignement spécifique) dans le contexte de la surveillance et de la lutte contre les pollutions. Une attention particulière a été portée à la diversité des transformations chimiques proposées et des techniques expérimentales mises en œuvre. Ainsi, les activités et les exercices s'appuient sur des réactions soit d'oxydo-réduction, soit acido-basiques soit de précipitation. Les activités expérimentales font appel à différents montages (à reflux, de titrage, de filtration).

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p.24

✓ Réponses aux questions

– Un réducteur est une espèce chimique susceptible de céder un ou plusieurs électrons. Un oxydant est une espèce chimique susceptible de capter un ou plusieurs électrons.

– $\text{Cu(s)} \rightarrow \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$

– La molécule d'eau, de formule H_2O , est une molécule polaire, caractère dû à la polarisation des deux liaisons OH.

– Un montage à reflux consiste à chauffer à ébullition un mélange réactionnel contenu dans un ballon. Les vapeurs s'élèvent dans un réfrigérant à boules alimenté en eau froide. Elles sont alors liquéfiées et retombent dans le ballon.

► S'interroger p. 24

L'émission dans l'atmosphère de polluants contenant des oxydes de soufre et d'azote est responsable de la formation d'acide nitrique HNO_3 et d'acide sulfurique H_2SO_4 . Ces acides diminuent le pH des pluies et favorisent le dépôt d'ions carbonate et sulfate sur les vitraux.

► Introduction p. 25

Le plomb est un métal toxique. Un contact prolongé avec le plomb peut provoquer de graves intoxications (saturnisme).

► Activité 1 p. 26

Cette activité documentaire sur les polluants organiques propose d'étudier, dans un premier temps, les effets de la pollution organique.

Dans un deuxième temps, elle s'intéresse plus particulièrement à la nature et la composition des polluants organiques persistants (POP) et à leur solubilité dans les graisses.

✓ Réponses aux questions

1. La décomposition des polluants organiques consomme le dioxygène dissous dans l'eau, ce qui entraîne un appauvrissement de la faune aquatique.

2. Les POP sont constitués de noyaux aromatiques et sont, pour la plupart, des composés organochlorés.

3. Les POP sont des molécules organiques apolaires ou faiblement polaires, et constitués essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène.

L'eau est un solvant polaire. Par conséquent, les POP sont faiblement solubles dans l'eau.

Les lipides sont des molécules faiblement polaires, constitués essentiellement de carbone et d'hydrogène. Les POP sont donc solubles dans les lipides.

4. La structure moléculaire d'un POP est caractérisée par la présence de noyaux aromatiques et, pour certains, par la présence de chlore.

► Activité 2 p. 27

Erratum : l'expression de l'IP est : $IP = \frac{M(O_2)}{4} \times 10^3 \times 5C_1 V_{eq}$

Cette activité expérimentale se déroule en deux parties.

Dans la partie A, il s'agit de mettre en œuvre un protocole expérimental pour mesurer un indice de la pollution organique d'une eau de rivière et de comparer cet indice à une valeur maximale admissible. Le protocole expérimental est constitué d'un montage à reflux et d'un dosage manganométrique.

La partie B doit amener l'élève à construire une démarche expérimentale pour déterminer l'impact d'une pollution à l'éthanol.

Pour cette activité, on peut envisager de scinder la classe en deux groupes, l'un en charge de la partie A, l'autre de la partie B.

Matériel

- Solution de saccharose à $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution de permanganate de potassium à $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution d'oxalate de sodium à $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, solution d'acide sulfurique à $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution aqueuse d'éthanol à $4 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Chauffe-ballon ; ballon tricol de 250 mL, thermomètre, ampoule de coulée, réfrigérant à boules, olive aimantée. Burette de 25,0 mL, pipettes jaugées de 10,0 mL et 20,0 mL.

✓ Réponses aux questions

1. La solution de permanganate de potassium doit être prélevée avec précision. Une pipette jaugée est la pièce de verrerie la plus appropriée.
2. Le permanganate de potassium en solution est rose. Avant l'équivalence, les ions permanganate introduits réagissent avec les ions oxalate. À la première goutte en excès de la solution titrante, les ions permanganate donnent une coloration rose à la solution.
3. Pour $V_{eq} = 15 \text{ mL}$, $IP = 120 \text{ mg de } O_2 \text{ par litre}$.
4. L'indice permanganate de la solution de saccharose est nettement supérieur à la norme admissible. Cette eau nécessite un traitement préalable avant de pouvoir être consommée.
5. **NB :** La concentration de la solution d'éthanol a été choisie de manière à ce que le volume équivalent soit de 15 mL pour une prise d'essai de 10,0 mL.
La détermination de l'indice permanganate de l'eau polluée peut être déterminée en suivant le même protocole que dans la partie A.
6. Non. Par exemple, les POP résistent aux traitements chimiques et, en particulier, ne sont pas oxydables par l'ion permanganate.
7. L'indice permanganate ne mesure donc que la pollution organique des matières oxydables par l'ion permanganate.

► Activité 3 p. 28

Précision : sur le doc. 5, la solubilité est exprimée en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Cette activité expérimentale porte sur la pollution minérale par les métaux lourds. Les élèves doivent rechercher les causes et les effets de cette pollution sur les organismes vivants. Puis, ils doivent mettre en œuvre un protocole de dépollution d'une eau contenant des ions permanganate. Enfin, ils proposeront une démarche expérimentale pour tester l'efficacité du traitement subi par l'eau polluée.

On peut envisager qu'au sein de chaque binôme, un élève réalise la dépollution de l'eau et l'autre élève construise la démarche expérimentale qui vise à contrôler la qualité de l'eau dépolluée.

Matériel

- Solution de permanganate de potassium à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution d'acide sulfurique au $1/10$.
- Solution d'acide chlorhydrique au $1/10$.
- Solution de sulfate de fer(II) à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution de soude à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution de sulfate de fer(III) à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Solution de chlorure de manganèse(II) à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Sel de Mohr solide.
- Hydroxyde de calcium solide.
- Bécher de 250 mL, entonnoir en verre, filtre plissé.
- Spatules, pipettes Pasteur, tubes à essai, papier pH.

✓ Réponses aux questions

1. Les métaux lourds sont présents naturellement dans l'environnement. Cependant, les activités humaines libèrent ces polluants potentiels qui peuvent s'accumuler dans les sols ou dans l'eau.

Leur toxicité dépend de leur concentration. Certains ont des effets bénéfiques dans l'organisme à des doses appropriées. Par exemple, le mercure est très dangereux s'il est inhalé, mais ingéré à des doses convenables, il pouvait être utilisé dans le traitement de la syphilis.

2. a. Les ions fer(II) sont introduits pour réduire les ions permanganate.

b. La solution d'acide sulfurique apporte des ions H^+ , nécessaires à la réduction des ions permanganate.

c. La concentration en ions Mn^{2+} doit être inférieure à $50 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ dans l'eau potable [doc. 6], ce qui correspond à $\log(s) = \log\left(\frac{50 \cdot 10^{-6}}{M(\text{Mn})}\right) = -6,04$ et $\text{pH} = 10,6$ sur la courbe [doc. 5].

3. Dans des tubes à essais, ajouter quelques millilitres d'une solution contenant le cation à tester, puis quelques gouttes d'une solution de soude à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Cation	En présence de soude
Mn^{2+}	Précipité blanc. Solution devient violette en présence d'acide périodique.
Fe^{2+}	Précipité vert, devenant orange au bout de quelques minutes.
Fe^{3+}	Précipité rouille.

4. Dans des tubes à essais, ajouter quelques millilitres du filtrat, puis quelques gouttes d'une solution de soude à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Aucun précipité ne se forme. Les ions Mn^{2+} , Fe^{2+} et Fe^{3+} ne sont pas présents. Le traitement a donc été efficace.

5. Les traitements possibles sont présentés dans le tableau ci-dessous.

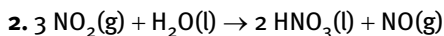
	Traitement chimique	Traitement physique
Étape 1	Réduction	
Étape 2	Précipitation	
Étape 3	Neutralisation	Filtration

► Activité 4 p. 29

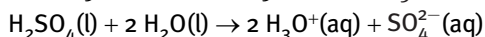
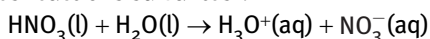
Cette activité documentaire sur les pluies acides a pour objectifs d'identifier les sources des pluies acides à l'aide d'un schéma de synthèse et les moyens techniques de les limiter en étudiant le principe du pot catalytique, et d'analyser leurs effets sur la dégradation des vitraux.

✓ Réponses aux questions

1. Les polluants gazeux responsables des pluies acides proviennent des rejets gazeux de certaines industries, des gaz d'échappements des automobiles, des engrais azotés et des émissions des volcans.



3. L'acide nitrique HNO_3 et l'acide sulfurique H_2SO_4 libèrent des ions H_3O^+ en réagissant avec l'eau selon les équations des réactions suivantes :



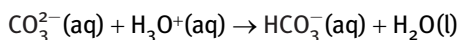
4. Les métaux alcalins sodium et potassium forment des ions monoatomiques Na^+ et K^+ . Ces ions se combinent avec les ions carbonate et les ions sulfate pour former des dépôts de carbonate de sodium ou de potassium et des dépôts de sulfate de sodium ou de potassium.

5. Le catalyseur, le rhodium, accélère la réaction de réduction du monoxyde d'azote.

6. Le diazote N_2 est le principal constituant de l'air. Son émission est sans conséquence.

Le dioxyde de carbone CO_2 est un gaz à effet de serre, dont l'augmentation de la concentration dans l'atmosphère depuis deux siècles est une des causes du réchauffement climatique. Son émission doit donc être limitée.

7. Le calcaire, de formule CaCO_3 , contient des ions carbonate CO_3^{2-} . Sous l'action des pluies acides, le calcaire est dissous et les ions carbonate sont transformés suivant la réaction d'équation :



D. Déroulement du cours

On peut compter pour ce chapitre deux séances d'activités expérimentales, et une séance d'activité documentaire et d'exercices.

Exemple de progression :

Séance de TP • Activité 1 (30 min) et activité 2 (1 h 30).

Séance de TP • Activité 3 (2 h).

Séance d'activité documentaire et d'exercices • Activité 4 (45 min) et exercices (1 h 15).

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 205.

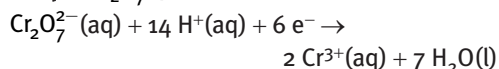
5 1. Les ions phosphate, chargés négativement, et les ions métalliques, chargés positivement, sont liés par des liaisons ioniques.

2. L'ion phosphate est une base dont le domaine de prédominance se situe à $\text{pH} > \text{p}K_A = 12,7$. Il est donc efficace en milieu basique.

3. Ces ions ont été supprimés dans les lessives car ils favorisent la prolifération des algues vertes.

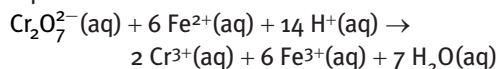
6 1. Écriture des demi-équations :

Couple $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+}$:



Couple $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$: $\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + \text{e}^-$

Équation de la réaction :



2. L'acide sulfurique apporte les ions H^+ nécessaires à la transformation (voir équation ci-dessus).

3. La réduction des ions dichromate conduit à la formation des ions Cr^{3+} qui précipitent ensuite en présence d'ions hydroxyde. Leur élimination est donc facilitée.

4. Le précipité peut être éliminé par décantation, puis filtration.

7 1. Il s'agit des pictogrammes signalant un danger pour la santé :



2. Il faut se protéger d'un contact avec le benzène et ne pas l'inhaler. En conséquence, se munir d'une blouse, de gants et de lunettes, et le manipuler sous une hotte aspirante. Notons que le benzène est interdit dans les lycées.

8 1. Les hydrocarbures sont des molécules composées de carbone et d'hydrogène. Ce

sont des molécules apolaires qui ne sont donc pas solubles dans l'eau.

2. La queue apolaire du tensioactif est dirigée vers la particule de pétrole et la tête polaire vers l'eau.

9 1. La molécule de DDT comporte des cycles aromatiques et du chlore. Elle possède la structure chimique des POP.

2. Le DDT est une molécule faiblement polaire, constituée essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène, qui n'est pas soluble dans l'eau, solvant polaire. En revanche, il est soluble dans les graisses, constituées de molécules faiblement polaires, composées essentiellement de carbone et d'hydrogène.

3. Le DDT s'accumule dans les graisses des tissus vivants et est un polluant organique persistant qui résiste aux traitements physico-chimiques.

10 1. La valeur du coefficient de détermination n'est pas très satisfaisante. Une valeur supérieure à 0,999 aurait été souhaitable.

2. La DCO peut être déterminée graphiquement ou par calcul à partir de l'équation de la droite d'étalonnage.

Par le calcul, $\text{DCO} = \frac{0,405 - 0,0212}{0,0005} = 768 \text{ mg de O}_2 \text{ par litre.}$

3. La valeur de la DCO de cette eau est supérieure à la valeur limite autorisée. Il est nécessaire de réduire la pollution organique pour la rendre consommable.

11 1. Selon l'équation de la réaction de dosage, les ions plomb et l'EDTA réagissent mole à mole. À l'équivalence, on a alors :

$$n(\text{Pb}^{2+}) = n(\text{EDTA}), \text{ soit } c_{\text{Pb}} V_{\text{Pb}} = c_{\text{EDTA}} V_{\text{eq}}$$

$$\text{et } c_{\text{Pb}} = c_{\text{EDTA}} \frac{V_{\text{eq}}}{V_{\text{Pb}}}$$

2. La concentration molaire en plomb est $c_{\text{Pb}} = 0,0200 \times \frac{12,7}{250,0} = 0,0102 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

La concentration massique ρ en plomb est donnée par la relation : $\rho = c_{\text{Pb}} M(\text{Pb})$, soit $\rho = 0,0102 \times 207,2 = 0,211 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

3. La concentration massique en plomb est supérieure à la limite autorisée, cette eau n'est donc pas potable.

F. Réponses aux sujets BAC p. 34-35

12 1. La prolifération des algues vertes sur le littoral français est attribuée à un apport excessif d'azote dans la mer, essentiellement sous forme d'ions nitrate.

2. L'augmentation de la concentration en ions nitrate est due à l'utilisation d'engrais azotés (activités agricoles).

3. La concentration massique de la solution mère est donnée par la relation :

$$\rho = \frac{m(\text{KNO}_3)}{V}, \text{ soit } \rho = \frac{164,4}{1} = 164,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}.$$

4. Les concentrations des solutions de la gamme étalon doivent encadrer la limite autorisée et être du même ordre de grandeur. Ainsi, on peut choisir des solutions de concentrations égales à 0 ; 20 ; 40 ; 60 et 80 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

5. Le volume V_m (en mL) de la solution mère à prélever est donné par la relation :

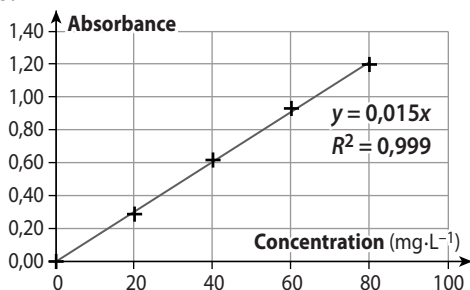
$$V_m = \frac{\rho_g \times 25,0}{164,4}, \rho_g \text{ étant la concentration}$$

massique souhaitée pour la solution de la gamme étalon. Les résultats des calculs sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

$\rho_g (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	20	40	60	80
$V_m (\text{mL})$	0	3	6	9	12

Pour réaliser les solutions de la gamme étalon, il faut utiliser des fioles jaugées de 25,0 mL et une burette graduée pour prélever les volumes de la solution mère.

6.



Le coefficient de détermination est égal à 0,999. Il est donc tout à fait satisfaisant.

7. a. La concentration peut être déterminée graphiquement ou à partir de l'équation de la droite d'étalonnage.

Par calcul :

$$\rho_{\text{éch}} = \frac{0,47}{0,015} = 31,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}.$$

La concentration en ions nitrate de cette eau est inférieure à la limite autorisée. Cette eau peut donc être consommée.

b. Des erreurs peuvent être commises par le technicien lors du prélèvement de la solution mère à l'aide de la burette et lors de la préparation des solutions de la gamme étalon dans les fioles jaugées. La mesure de l'absorbance par le spectrophotomètre est également entachée d'une erreur.

13 1. Le dioxyde de carbone est présent sous forme dissoute ($\text{CO}_2(\text{aq})$), qui réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique H_2CO_3 .

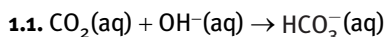
2. L'acide carbonique peut libérer des ions H^+ qui accroissent l'acidité de l'eau des océans.

3. L'augmentation de la concentration en ions H^+ provoque une diminution du pH vers le domaine de prédominance du $\text{CO}_2(\text{g})$. Par conséquent, la concentration en ions carbonate diminue.

4. La solubilité du carbonate de calcium diminue lorsque la température augmente.

5. Le carbonate de calcium, qui constitue les coquilles des récifs coralliens, se dissout plus facilement dans les eaux des océans acidifiés par l'apport d'acide carbonique. L'existence de ces récifs est donc menacée.

G. Épreuve expérimentale p. 36



1.2. On réalise un montage pH-métrique. La burette contient la solution d'hydroxyde de sodium à $0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Dans le bécher, on introduit la solution d'eau de pluie à doser dans laquelle plonge une électrode combinée pH-métrique. Il peut être nécessaire d'ajouter de l'eau distillée de manière à ce que l'électrode soit convenablement immergée. Pour déterminer la prise d'essai de la solution d'eau de pluie à prélever, on écrit la relation à l'équivalence :

$$n(\text{CO}_2) = n(\text{OH}^-), \text{ soit } c_1 V_1 = c_2 V_{\text{eq}}$$

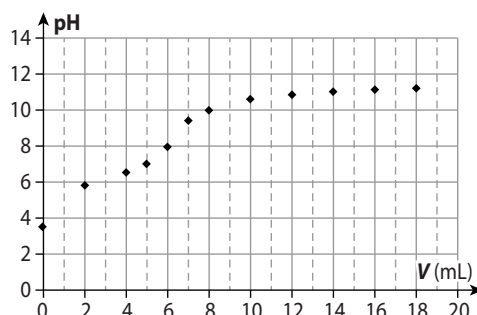
Pour un volume équivalent souhaité de 15 mL, la prise d'essai est $V_1 = 500 \text{ mL}$. On peut prélever 250,0 mL de l'eau de pluie pour un avoir un volume équivalent de 7,5 mL.

2.1 On relève le pH initial, puis pour chaque millilitre de la solution titrante ajouté. Les mesures doivent être resserrées autour du point équivalent.

2.2 Le volume équivalent peut être déterminé par la méthode des tangentes ou à l'aide d'un logiciel de traitement de données.

$$V_{\text{eq}} = 6,10 \text{ mL}$$

$$\text{et } c_1 = 0,05 \times \frac{6,10}{250} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$



3.1. Le pH à l'équivalence est égal à 8,4 et est situé dans la zone de virage de la phénolphtaléine. Il faudra donc choisir cet indicateur coloré pour réaliser le dosage colorimétrique.

3.2. Le volume mesuré par colorimétrie peut être légèrement différent de celui déterminé par pH-métrie. Dans le premier cas, la détermination de l'équivalence est liée à la détection de la coloration par l'élève et dans le second cas, elle est liée à la précision du pH-mètre.

H. Science et société p. 37

Développement durable.

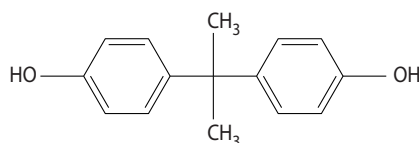
La phytoremédiation

1. L'arsenic était utilisé pour l'extraction et le traitement des minerais du site de Salsigne. Cet élément s'est accumulé dans les sols.

2. La technique de phytoremédiation permet d'éliminer les métaux présents dans les sols. Cependant, ces mêmes métaux s'accumulent dans les plantes. Ils ne sont donc pas complètement éliminés.

Santé. Le bisphénol A

1. La formule du bisphénol A est donnée ci-contre. On remarque la présence de deux noyaux aromatiques, caractéristiques des POP.



2. La structure chimique du bisphénol possède les caractéristiques de celle des POP. Il est donc difficilement dégradé et s'accumule dans la chaîne alimentaire.

3. L'Assemblée nationale a voté en octobre 2011 une proposition interdisant le bisphénol A dans les contenants alimentaires à compter de 2014, mais dès 2013 pour les contenants alimentaires de produits destinés aux enfants de moins de 3 ans.

I. Compléments pédagogiques

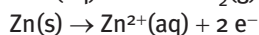
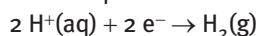
Les énoncés sont disponibles sur www.libtheque.fr/physiquechimie.lycee

► Corrigés

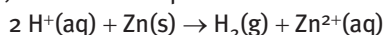
1 Les pluies solubilisent l'acide sulfurique qui libère des ions H^+ .

Ce dernier, qui est un oxydant, peut réagir avec le zinc, qui est un réducteur, constitutif des gouttières.

Écriture des demi-équations redox :



Puis, écriture de l'équation de la réaction :



Le zinc est donc oxydé par les pluies acides.

2 1. On écrit la relation entre les quantités de matière des ions permanganate et des ions Fe^{2+} à l'équivalence :

$$n(MnO_4^-) = n(Fe^{2+})/5.$$

La concentration $c_{MnO_4^-}$ est alors donnée par la relation suivante :

$$c_{MnO_4^-} = c_{Fe} V_{eq} / (5 V_{MnO_4^-}).$$

Les résultats sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

Élève	1	2	3	4
$c_{MnO_4^-} (10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1})$	1,22	1,21	1,04	1,21
Élève	5	6	7	8
$c_{MnO_4^-} (10^{-3} \text{ mol} \cdot L^{-1})$	1,20	1,27	1,20	0,78

2. Après avoir exclu les valeurs aberrantes obtenues par les élèves 3 et 8, la valeur moyenne est calculée et $c_{MnO_4^-} = 1,22 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$.

3. $\Delta c_{MnO_4^-} = \frac{2\sigma}{\sqrt{n}}$, où σ représente l'écart type.

$$\Delta c_{MnO_4^-} = 2,16 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot L^{-1}.$$

4. L'incertitude est exprimée avec un seul chiffre significatif. Le résultat s'exprime sous la forme :

$$c_{MnO_4^-} = 1,22 \pm 0,02 \text{ mmol} \cdot L^{-1}.$$

J. Bibliographie

- ✓ C. Lévêque, *Nos rivières sont-elles devenues des poubelles ?*, Le Pommier, 2006.
- ✓ « Les océans. Le nouveau monde de la chimie durable », Pour la Science, dossier n° 73, oct.-déc. 2011.
- ✓ Chimie du pot catalytique : <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/chimie-du-pot-catalytique-principe-enjeux-et-polemique-1059>
- ✓ La lutte contre les marées noires : <http://culturesciences.chimie.ens.fr/node/790>

Chapitre 3

L'EAU ET SES RESSOURCES

A. Le programme

Thème 1 : L'eau

Domaine d'étude	Mots-clés
Eau et ressources	• Production d'eau potable • Traitement des eaux • Ressources minérales et organiques dans les océans • Hydrates de gaz

✓ Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties

– Pratiquer une démarche expérimentale pour déterminer la concentration d'une espèce à l'aide de courbes d'étalonnage en utilisant la spectrophotométrie et la conductimétrie, dans le domaine de la santé, de l'environnement ou du contrôle de la qualité

– 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.

– Identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base connaissant le pH du milieu et le pK_A du couple.

B. La démarche adoptée dans le manuel

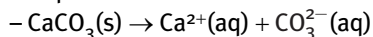
Le choix a été fait ici de limiter à quelques opérations la partie sur le traitement des eaux. Il nous est apparu en effet peu opportun de traiter de manière exhaustive l'ensemble du processus. Les activités expérimentales ont été privilégiées, en ayant le souci de n'utiliser que des produits et du matériel présents dans les laboratoires d'enseignement secondaire. Les techniques d'analyse mises en œuvre sont celles du programme d'enseignement spécifique. Les ressources des océans sont riches et variées. Vous en trouverez quelques exemples dans les activités et les exercices de ce chapitre.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p. 38

✓ Réponses aux questions

– La solubilité, souvent exprimée en $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, est la masse maximale d'une espèce chimique que l'on peut dissoudre dans un volume de solvant donné, à une température donnée.



– Dans une eau acidulée, contenant des ions H^+ , l'ion carbonate CO_3^{2-} , qui se comporte comme une base, peut se transformer en ion hydrogénocarbonate HCO_3^- , son acide conjugué. Cet équilibre acido-basique favorise la dissolution du tartre et augmente sa solubilité.

– Les interactions de van der Waals sont des interactions attractives qui s'exercent entre des molécules polaires ou apolaires, mais qui peuvent le devenir par influence.

► S'interroger p. 38

Les matériaux poreux peuvent fixer les polluants à l'intérieur des pores, par la formation de liaisons de van der Waals.

► Question d'introduction p. 39

Les hydrates de gaz renferment des gaz, comme le méthane, qui peuvent être exploités en tant que source d'énergie.

► Activité 1 p. 40-41

Cette activité expérimentale porte sur la dureté de l'eau. Dans la première partie, cette grandeur est définie et une mesure de la dureté de l'eau de Contrex est proposée. La détermination de la dureté par complexométrie exige l'emploi d'une solution tampon, dont le rôle est interprété à l'aide d'une série de manipulations. On peut envisager une répartition des tâches au sein de chaque binôme : un élève réalise le dosage et l'autre les expériences pour interpréter le rôle de la solution tampon.

La deuxième partie vise à comprendre le principe de la réduction de la dureté de l'eau et à tester l'efficacité des carafes filtrantes.

Matériel

– Solution d'EDTA à $1,00 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

– NET ; solution tampon pH 10.

– Solution d'hydroxyde de sodium à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, solution d'acide chlorhydrique à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

– Eau de Contrex.

– Burette de 25,00 mL, erlenmeyer de 250 mL, pipette jaugée de 10,00 mL ; tubes à essai ; entonnoir en verre ; filtres papier ; papier pH.

– Résines de cartouche de carafe filtrante ou résines échangeuses d'ions.

✓ Réponses aux questions

1. Une mole d'un cation calcium ou magnésium réagit avec une mole d'EDTA. Par conséquent à l'équivalence : $n_{\text{TOT}} = n(\text{Ca}^{2+}) + n(\text{Mg}^{2+}) = n(\text{EDTA})$ et finalement $c_{\text{TOT}} = \frac{c_{\text{EDTA}} V_{\text{eq}}}{10}$, le volume d'eau de Contrex prélevé étant de 10,0 mL.

2. Pour repérer l'équivalence, il faut pouvoir observer un changement de coloration facilement identifiable. Avant l'équivalence, sont présents en solution les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} , et le NET. Après l'équivalence, les ions calcium et magnésium ont été fixés par l'EDTA, seul le NET est encore présent. Les élèves ont reproduit les conditions du dosage avant et après l'équivalence dans des tubes à essai en faisant varier le pH. Ils ont pu noter que pour $\text{pH} = 10$, les couleurs des solutions sont nettement distinctes, ce qui justifie l'emploi de la solution tampon $\text{pH} = 10$.

3. Pour $V_{\text{eq}} = 15 \text{ mL}$, $\text{TH} = 150 \text{ °f}$.

4. Sur l'étiquette, les concentrations en ions calcium et magnésium sont respectivement de $468 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ et $74,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. La dureté de l'eau de Contrex est donc, en degrés français :

$$\text{TH} = \frac{468}{4} + \frac{74,5}{2,4} = 148 \text{ °f}.$$

L'écart constaté entre la valeur déterminée expérimentalement et la valeur calculée à partir des informations fournies sur l'étiquette peut être attribué aux erreurs de manipulations lors du prélèvement de l'eau de Contrex, ou encore à l'imprécision liée au changement de coloration à l'équivalence.

5. Les savons contiennent des sels dérivés d'ions carboxylate, peu solubles dans l'eau. Leur concentration diminue dans les eaux dures, ce qui a pour effet de réduire l'efficacité des savons.

6. Pour conserver l'électroneutralité de l'eau, deux ions sodium (une seule charge positive) sont libérés pour un ion calcium (deux charges positives) adsorbé.

7. Le sel contenu dans le bac à sel sert à régénérer les résines saturées en ions calcium. La solution salée circule à travers la bouteille contenant les résines, où elle échange des ions sodium contre des ions calcium.

8. Une eau adoucie de $\text{TH} < 15 \text{ °f}$ et enrichie en ions sodium ne doit pas être utilisée de manière régulière pour la consommation humaine. Son usage doit être prioritairement réservé pour les appareils ménagers.

9. Prélever un volume (50 mL) d'eau de Contrex et la filtrer sur les résines d'une cartouche de carafe filtrante. Recueillir l'eau adoucie dans un bécher.

10. Prélever 10,00 mL d'eau de Contrex adoucie et mesurer la dureté de cette eau en suivant le protocole décrit précédemment.

► **Activité 2** p. 42

Cette activité est découpée en deux parties : la première partie, documentaire, présente les charbons actifs et leur utilisation dans la dépollution des eaux usées ; la deuxième partie, expérimentale, est une application au laboratoire des techniques de dépollution d'une eau colorée, exploitant les propriétés des matériaux poreux, comme le charbon actif. Elle s'appuie sur la méthode de dosage spectrophotométrique vue en classe de 1^{re} S et en classe de T^{erm} S, enseignement spécifique.

Matériel

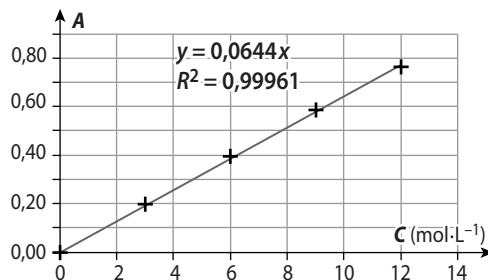
- Bleu de méthylène en poudre ou collyre au bleu de méthylène à $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Charbon actif ou noir de carbone.
- Spectrophotomètre et cuves.
- Balance.
- Papier-filtre et entonnoir en verre.
- Agitateur magnétique.
- Béchers de 250 mL.

✓ Réponses aux questions

1. Les pores des charbons actifs offrent une grande surface sur laquelle peuvent se fixer les polluants.
2. La masse de colorant adsorbé par gramme de charbon actif augmente pour des faibles valeurs de concentration, puis elle tend vers une valeur asymptotique pour des valeurs plus importantes de la concentration du colorant en solution. La capacité d'adsorption du charbon actif est donc limitée pour de fortes concentrations.
3. Dépollution des eaux résiduaires industrielles : industrie agroalimentaire, industrie textile, etc.
4. Le bleu de méthylène est une molécule organique colorée en raison de la présence d'un nombre important de liaisons doubles conjuguées.
5. Dans un premier temps, on construit la droite d'étalonnage (voir fiche méthodologique p. 200 du manuel). Puis, à partir des mesures de l'absorbance des eaux polluée et traitée, on détermine les concentrations massiques de ces deux solutions, C_o et C_e .

Les résultats expérimentaux sont réunis dans le tableau ci-dessous.

Solution étalon	n° 0	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4	n° 5
$C \text{ (mg} \cdot \text{L}^{-1}\text{)}$	0,0	3,0	6,0	9,0	12,0	15,0
A	0,0000	0,1966	0,3932	0,5843	0,7648	0,9312



L'absorbance de l'eau polluée est de 0,6632, celle de l'eau traitée de 0,2192. L'équation de la droite d'étalonnage permet de calculer : $C_o = 10,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ et $C_e = 3,4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

$$6. q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m} = (10,3 - 3,4) \times \frac{50,0 \cdot 10^{-3}}{500} = 0,69 \cdot 10^{-3}, \text{ soit } 0,69 \cdot 10^{-3} \text{ mg de bleu de méthylène adsorbé par mg de charbon actif.}$$

7. On peut, par exemple, augmenter la masse de charbon actif ou augmenter le temps de contact entre le charbon actif et le polluant.

► Activité 3 p. 43

Cette activité documentaire s'appuie sur un fait d'actualité, l'explosion de la plate-forme pétrolière *Deepwater Horizon* qui a eu lieu en avril 2010, et tente d'élucider les causes des difficultés à pomper le gaz tapi dans les fonds océaniques vers la surface. Elle s'intéresse aux conditions de formation des hydrates de gaz, à leur composition et à leur structure cristallographique.

✓ Réponses aux questions

1. Entre environ 500 et 1 500 m de profondeur, la pression varie de 50 à 150 bar pour une température variant entre 10 et 5 °C.

2. Le méthane, constitué d'atomes d'hydrogène et de carbone de faible électronégativité, est une molécule apolaire.
3. $n_{\text{méthane}} = \frac{164 \cdot 10^3}{24,79} = 6,62 \cdot 10^3 \text{ mol}$, ce qui correspond à $6,62 \cdot 10^3 \times 6,02 \cdot 10^{23}$ molécules de méthane.
4. a. $0,8 \times 1\,000 = 800 \text{ kg}$, donc $n_{\text{eau}} = \frac{800 \cdot 10^3}{18} = 44,4 \cdot 10^3 \text{ mol}$, ce qui correspond à $44,4 \cdot 10^3 \times 6,02 \cdot 10^{23}$ molécules d'eau.
- b. Soit $\frac{44,4 \cdot 10^3}{6,62 \cdot 10^3} = 6$ à 7 molécules d'eau pour 1 molécule de méthane.
5. a. La représentation [doc. 10] indique 20 molécules d'eau pour 1 molécule de méthane. Chaque molécule d'eau comptant pour un tiers, le nombre moyen est donc de 6 à 7 molécules d'eau pour une molécule de méthane.
- b. La valeur calculée est compatible avec la géométrie proposée.
6. Le puits libre des hydrocarbures, dont du méthane, qui cristallisent avec l'eau dans les conditions favorables de température et de pression.
7. Les difficultés d'exploitation des hydrates de gaz sont liées aux fortes pressions dans les fonds océaniques. L'extraction des hydrates de gaz risque de provoquer la formation de cristaux et donc de freiner leur récupération vers la surface.

D. Déroulement du cours

On peut compter pour ce chapitre trois séances d'activités expérimentales et une séance d'activité documentaire et d'exercices.

Exemple de progression :

Séance de TP • Activité 1, partie A (2 h).

Séance de TP • Activité 1, partie B (2 h)

Séance de TP • Activité 2 (2 h).

Séance d'activité documentaire et d'exercices • Activité 3 (45 min) et exercices (1 h 15).

E. Réponses aux exercices p. 46-47

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 205.

5 1. L'indigotrisulfonate présente un grand nombre de liaisons doubles conjuguées.

2. L'indigotrisulfonate possède des atomes d'oxygène de forte électronégativité et des atomes d'hydrogène liés à des atomes d'azote électronégatifs. Des liaisons hydrogène se créent entre les molécules d'eau et l'indigotrisulfonate, et assurent ainsi sa solubilité.

3. La concentration molaire de l'ozone est :

$$C(\text{O}_3) = \frac{50 \times 10^{-6}}{48} = 1,04 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Les concentrations des solutions étalons en indigotrisulfonate de potassium sont choisies de manière à ce que la concentration de l'ozone dans l'eau soit du même ordre de grandeur :

$$C_1 = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$C_2 = 0,8 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1};$$

$$\text{et } C_3 = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

Régler la longueur d'onde du spectrophotomètre sur 600 nm. Faire le zéro avec de l'eau distillée.

Mesurer l'absorbance des solutions étalons et construire la droite d'étalonnage.

À un volume de l'eau ozonée, ajouter un même volume de la solution d'indigotrisulfonate de potassium à la concentration de $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. L'ozone réagit mole à mole avec l'indigotrisulfonate et décolore la solution. Mesurer l'absorbance de la solution obtenue.

À l'aide de l'équation de la droite d'étalonnage, en déduire la concentration C_i en indigotrisulfonate restant. Calculer alors la concentration de la solution d'eau ozonée :

$$C(\text{O}_3) = C_3 - C_i.$$

6 1. Pour l'adénine, l'absorption maximale a lieu pour $\lambda = 260 \text{ nm}$. Pour la cytosine, $\lambda = 250 \text{ nm}$. Pour la thymine, $\lambda = 260 \text{ nm}$. Pour la guanine, $\lambda = 270 \text{ nm}$.

2. L'absorption maximale du rayonnement solaire se produit dans le domaine des UV-C pour les quatre bases azotées. Dans ce domaine, l'efficacité de la désactivation des micro-organismes est maximale.

3. Les bases azotées composent également l'ADN. Une exposition prolongée aux UV-C peut provoquer un blocage des processus biologiques.

7 1. Au niveau de l'évaporateur, le fluide de travail passe de l'état liquide à l'état gazeux (vaporisation). Au niveau du condenseur, le fluide de travail passe de l'état gazeux à l'état liquide (liquéfaction).

2. L'eau de mer chaude cède de la chaleur pour vaporiser le fluide de travail. Lors de sa condensation, le fluide de travail cède de la chaleur à l'eau de mer froide.

8 1. Dans une fiole jaugée de 100,0 mL, introduire 10,0 mL de l'eau de marais prélevée à la pipette jaugée. Compléter la fiole jaugée jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée et agiter.

2. Avant l'équivalence, la concentration en ion sodium est stable, la concentration en ion chlorure diminue, la concentration en ion argent est négligeable et la concentration en ion nitrate augmente. Les conductivités molaires

ioniques des ions chlorure et nitrate sont égales. Par conséquent, la conductivité de la solution varie peu.

Après l'équivalence, la concentration en ion sodium est stable, la concentration en ion chlorure est négligeable, les concentrations en ion argent et en ion nitrate augmentent. Par conséquent, la courbe est croissante.

3. Le point équivalent est situé à l'intersection des deux droites de régression. Le volume à l'équivalence est $V_{\text{eq}} = 15 \text{ mL}$.

4. À l'équivalence, $n(\text{Cl}^-) = n(\text{Ag}^+)$, donc :

$$C_1 = \frac{C_2 V_{\text{eq}}}{V_1}.$$

Soit $C_1 = 0,15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 5,3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

5. La concentration en ions chlorure de l'eau de mer est alors $10C_1$, soit $53 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. Cette valeur est supérieure à $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ et est donc favorable au développement des artémies.

9 1. Préparer la burette avec la solution d'acide chlorhydrique.

Prélever 50,0 mL de l'eau à analyser à l'aide d'une pipette jaugée et les introduire dans un bécher de 150 mL. Plonger les électrodes pH-métriques reliées au pH-mètre dans la solution. Ajouter éventuellement quelques gouttes de phénolphthaléine et de vert de bromocrésol.

Relever les valeurs de pH en fonction du volume de la solution d'acide chlorhydrique versé.

2. Les coordonnées du point à l'équivalence sont déterminées par la méthode des tangentes parallèles : $\text{pH} = 4,8$ et $V_{\text{eq}} = 14,5 \text{ mL}$.

3. Le pH à l'équivalence est dans la zone de virage du vert de bromocrésol (voir à la fin du manuel). Cet indicateur coloré est donc adapté à la détermination du TAC.

4. Pour le dosage de 50,0 mL de cette eau, le volume à l'équivalence est 14,5 mL. Le TAC de cette eau est donc 29 mL.

10 1. La mesure n° 4 est éliminée. La valeur moyenne est : $\text{TA} = 17,41 \text{ mL}$.

2. Au niveau de confiance de 95 %, $\Delta \text{TA} = \frac{2\sigma}{\sqrt{n}}$.

On calcule $\sigma = 0,13 \text{ mL}$ et $\Delta TA = 0,13 \text{ mL}$. L'incertitude s'exprime avec un seul chiffre significatif. Ici $\Delta TA = 0,1 \text{ mL}$.

3. L'incertitude impose le nombre de chiffres significatifs. $TA = 17,4 \pm 0,1 \text{ mL}$.

F. Réponses aux sujets BAC p. 48-49

11 1. Un certain nombre d'eaux minérales (eaux de Vichy, en particulier) présentent une concentration massique en ion fluorure supérieure à $1,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Leur consommation régulière peut entraîner des risques de fluorose.

2. Les ions fluorure forment des composés insolubles avec les cations métalliques. La solubilité de CaF_2 est la plus faible. Par conséquent l'ion calcium est le mieux adapté pour éliminer la plus grande quantité d'ions fluorure.

La chaux est composée d'ions calcium et d'ions hydroxyde. L'ajout d'ions calcium provoque une augmentation de la dureté de l'eau et l'ajout d'ions hydroxyde a pour effet d'augmenter le pH.

3. L'ion fluorure est la base conjuguée de l'acide fluorhydrique HF. Une diminution du pH induit une transformation des ions fluorure en HF et donc une moindre élimination des ions fluorure.

4. Sur la courbe d'étalonnage, on lit pour $\Delta E = 250 \text{ mV}$, $pF = 4,2$, soit $[F^-] = 10^{-4,2} = 6,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 1,2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. La concentration massique de cette eau est inférieure à la limite maximale de la norme fixée à $1,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Cette eau est donc propre à la consommation humaine.

12 1. HClO est majoritaire pour $\text{pH} < \text{p}K_A = 7,5$. Le pH doit donc être fixé à une valeur inférieure au $\text{p}K_A$.

2. Dans une fiole jaugée de volume $V_f = 100,0 \text{ mL}$, introduire une prise d'essai de volume $V = 10,0 \text{ mL}$, prélevée à la pipette jaugée, de la solution d'eau de Javel. Compléter à l'aide d'eau distillée jusqu'au trait de jauge et agiter.

3. L'acide éthanoïque apporte les ions H^+ nécessaire à la réaction de formation des ions triiodure.

4. Les ions iodure sont apportés en excès afin de réagir totalement avec les ions hypochlorite ClO^- .

5. Selon la réaction de formation des ions triiodure : $n(\text{ClO}^-) = n(\text{I}_3^-)$.

Selon la réaction de dosage des ions triiodure :

$$n(\text{I}_3^-) = \frac{n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})}{2}$$

$$\text{D'où } n(\text{ClO}^-) = \frac{n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})}{2}$$

6. L'expression de la concentration en eau de Javel est donnée par la relation suivante :

$$C'(\text{ClO}^-) = \frac{C(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})V_{\text{éq}}}{(2V_{\text{S}}')}$$

Or, $C(\text{ClO}^-) = 10C'(\text{ClO}^-)$,
soit $C(\text{ClO}^-) = 0,395 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

7. La désinfection par le chlore n'est pas recommandée pour des eaux riches en matière organique. En effet, des sous-produits nocifs pour la santé peuvent être formés.

G. Épreuve expérimentale p. 50

1.1. Il faut sélectionner la longueur d'onde correspondant au maximum d'absorption de la

solution de chlorure de nickel. Sur le spectre d'absorption, on relève $\lambda = 400 \text{ nm}$.

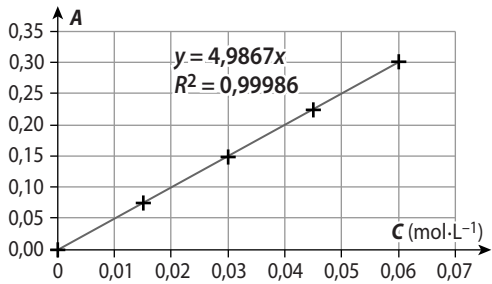
1.2. $\text{NiCl}_2(\text{s}) = \text{Ni}^{2+} + 2\text{Cl}^-$
On en déduit : $[\text{Cl}^-] = 2[\text{Ni}^{2+}]$.

1.3. On prépare des solutions étalons de concentrations $0,015 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $0,030 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $0,045 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et $0,060 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ dans des fioles jaugées de 50,0 mL. On prélève donc respectivement 7,5 mL, 15 mL, 22,5 mL et 30 mL de la solution mère à l'aide d'une burette, puis on complète au trait de jauge avec de l'eau distillée. Après avoir agité, on mesure l'absorbance des solutions étalons, puis de la solution à la concentration approximative de $0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le zéro est réalisé avec de l'eau distillée. On construit la droite d'étalonnage et on détermine la concentration de la solution à analyser.

2.2. Les résultats expérimentaux sont réunis dans le tableau ci-dessous.

Solution étalon	n° 0	n° 1	n° 2	n° 3	n° 4
c ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	0	0,015	0,030	0,045	0,060
A	0	0,075	0,148	0,223	0,301

Le coefficient de corrélation est supérieur à 0,999.



3.1. L'absorbance de la solution à analyser est 0,246.

L'équation de la droite d'étalonnage permet de calculer $c_{\text{Ni}^{2+}} = 0,049 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

3.2. Des erreurs ont pu être commises lors de la préparation des solutions étalons, en particulier au cours de l'utilisation de la burette et de l'ajustage au trait de jauge dans les fioles jaugées.

La mesure de l'absorbance des solutions par le spectrophotomètre est entachée d'une erreur.

H. Science et société p. 109

Technologie.

L'énergie des mers : la force du sel

1. L'eau douce se déplace du compartiment d'eau douce vers le compartiment d'eau salée à travers la membrane.

2. Les énergies marines exploitent le vent (éoliennes flottantes), les courants (hydrolienne), les vagues, les marées (usine marémotrice de la Rance), la biomasse (algues pour la production de biocarburants), la différence de température entre les eaux de surface et eaux profondes (énergie thermique, voir exercice 7 du manuel) et la différence de concentration en sel de l'eau douce et l'eau de mer.

3. La consommation électrique mondiale est de l'ordre de 16 000 TWh par an. Le potentiel de l'énergie marine tirée de l'exploitation du sel est estimé à 2 000 TWh par an, ce qui représente 12,5 % de la consommation totale.

Santé. Le secret des oiseaux

1. L'acide domoïque produit par une algue rouge est ingéré par les mollusques, puis transmis aux prédateurs marins, les oiseaux.

2. L'halichondrine B, qui est produite par les éponges pour se protéger, est exploitée dans les traitements anticancéreux.

La ziconotide, utilisée par certains cônes marins pour harponner les poissons, possède des propriétés antidouleur.

I. Compléments pédagogiques

Les énoncés sont disponibles sur www.libtheque.fr/physiquechimie.lycee

► Corrigés

1 1. Les molécules naturelles d'intérêt thérapeutique posent un problème d'approvisionnement. Soit elles ne sont pas abondantes, soit il est difficile d'atteindre des rendements élevés d'extraction.

2. Les groupes caractéristiques présents dans la molécule de la tyrosine sont les groupes carboxyle $-\text{COOH}$ et amine $-\text{NH}_2$, caractéristiques des acides aminés.

3. La spectroscopie IR peut être utilisée pour identifier les groupes fonctionnels acide carboxylique et amine. La spectroscopie RMN peut être utilisée pour identifier la structure de la molécule.

2 1. L'hexane est un hydrocarbure composé d'atomes de carbone et d'hydrogène. Il peut donc solubiliser les huiles composées d'atomes de carbone et d'hydrogène.

2. a. L'hexane est dangereux pour la santé et l'environnement.

b. L'éther de pétrole est un hydrocarbure et peut solubiliser les triglycérides. Il est moins dangereux que l'hexane.

J. Bibliographie

- ✓ *La chimie et la mer*, collectif, EDP Sciences, 2009.
- ✓ « Les océans. Le nouveau monde de la chimie durable », *Pour la Science*, dossier n° 73, oct.-déc. 2011.
- ✓ L'eau, dossier transversal : <http://culturesciences.chimie.ens.fr/category/eau-51>
- ✓ Traitement des eaux : www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/potable/traitEau.html

Chapitre 4

UNE ÉNERGIE TIRÉE DE L'EAU

A. Le programme

Thème 1 : L'eau

Domaine d'étude	Mots-clés
Eau et énergie	• Piles à combustible • Production de dihydrogène

✓ **Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties**

- Écrire une équation de combustion.
- Argumenter sur l'impact environnemental des transformations mises en jeu.
- Modéliser le fonctionnement d'une pile.
- Relier la polarité de la pile aux réactions mises en jeu aux électrodes.
- Recueillir et exploiter des informations sur les piles ou les accumulateurs dans la perspective du défi énergétique.
- Reconnaître l'oxydant et le réducteur dans un couple.
- Écrire l'équation d'une réaction d'oxydo-réduction en utilisant les demi-équations redox.
- Extraire et exploiter des informations sur des réalisations ou des projets scientifiques répondant à des problématiques énergétiques contemporaines.

B. La démarche adoptée dans le manuel

La démarche adoptée dans ce chapitre est d'amener les élèves à réfléchir sur la problématique de l'énergie, plus particulièrement de l'avenir de l'industrie des transports, à partir de l'exemple d'une technologie ancienne, mais remise au goût du jour : la pile à hydrogène. Après avoir mis en évidence les avantages de la pile à hydrogène sur les modes de propulsion actuellement utilisés ou à l'étude, on se penchera sur le revers de la médaille : la production du dihydrogène (inexistant à l'état naturel), qui est actuellement encore coûteuse en énergie, principalement en énergie fossile.

À travers une démarche d'investigation faisant appel aussi bien à des activités expérimentales qu'à l'analyse de documents, les élèves exercent ici leur sens critique et se font leur propre opinion sur l'avenir de cette solution technologique.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p. 52

✓ Réponses aux questions

- La combustion d'un hydrocarbure produit du dioxyde de carbone et de l'eau.
- Une réaction d'oxydoréduction consiste en un transfert d'un ou de plusieurs électrons d'un réducteur vers un oxydant.
- Une pile fonctionne selon une réaction d'oxydoréduction, au cours de laquelle le transfert d'électrons se fait par un circuit électrique extérieur.
- Une source d'énergie renouvelable est une source d'énergie dont les quantités disponibles sont suffisamment importantes pour être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine.

► S'interroger p. 52

Les avantages à utiliser du dihydrogène pour propulser un engin spatial sont un rendement énergétique important et le fait que sa combustion ne libère que de l'eau. Par ailleurs, il s'agit d'un combustible potentiellement très abondant.

► Introduction p. 53

- À partir de l'eau, on peut obtenir du dihydrogène. Ce gaz présente deux avantages majeurs :
- ses propriétés réductrices peuvent être utilisées dans une pile à combustible, au sein de laquelle de l'énergie chimique est convertie en énergie électrique ;
 - la réaction du dihydrogène avec le dioxygène qui a lieu dans la pile à combustible ne produit que de l'eau. L'émission de gaz à effet de serre est donc nulle.

Toutefois, la production de dihydrogène par électrolyse de l'eau nécessite un apport d'énergie. Il est nécessaire de trouver des alternatives aux combustibles fossiles pour cette production.

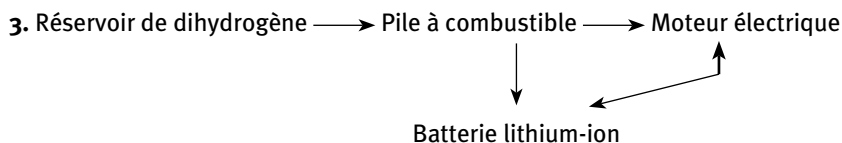
► Activité 1 p. 54

Cette activité met en évidence la nécessité de trouver une alternative au pétrole dans l'industrie du transport. Parmi les nombreuses solutions explorées, la plus récente est la pile à combustible. Cette technologie semble avoir dépassé le stade de l'expérimentation, comme le montre le projet londonien, lancé pour les Jeux olympiques d'été en 2012.

Avant de commencer cette activité, il est nécessaire d'introduire le sujet à partir des deux problèmes majeurs auxquels se prépare l'industrie des transports : la pénurie de combustibles fossiles à venir et le rôle des émissions de gaz à effet de serre dans le dérèglement climatique actuel. Une discussion avec les élèves permettra de poser les choses, notamment ce qu'ils savent ou pensent savoir.

✓ Réponses aux questions

1. Il ne reste que très peu de réserves de pétrole connues non encore exploitées, ce qui laisse l'industrie du transport face à un risque potentiel de pénurie.
2. La pile à combustible permet de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur électrique propulsant le véhicule.



4. Les avantages annoncés d'un tel véhicule sont son indépendance vis-à-vis du pétrole et le fait qu'il soit non polluant à l'usage.

5. On pourrait lui reprocher sa faible autonomie et son usage uniquement urbain.

6. Si on parvient à améliorer l'autonomie et la souplesse d'utilisation des véhicules, ainsi que le mode de production du dihydrogène, la pile à combustible pourrait être une solution d'avenir pour l'automobile.

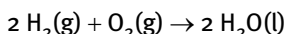
► Activité 2 p. 55

L'activité 2 détaille le principe de fonctionnement d'une pile à combustible. Elle permet notamment de justifier le terme de « pile » en montrant que ce système met en jeu une réaction d'oxydoréduction, dont les réactifs sont le dihydrogène (« combustible ») et le dioxygène (« comburant »). La pile convertit ainsi de l'énergie chimique en énergie électrique. L'activité met également en évidence la propreté de la pile à combustible à l'usage, car la réaction ne produit que de l'eau.

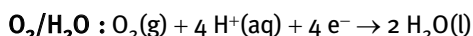
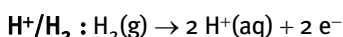
La fin de la séance sera l'occasion d'introduire la problématique du dihydrogène, gaz n'existant pas à l'état natif sur Terre. Pour que la pile à combustible soit viable, il est donc nécessaire de trouver un mode de production de dihydrogène à l'échelle industrielle.

✓ Réponses aux questions

1. D'après le texte, les réactifs sont le dihydrogène et le dioxygène, la réaction produisant de l'eau. L'équation de réaction associée à la transformation est donc :



Les couples redox mis en jeu et les demi-équations associées sont :



2. a. L'énergie issue de la réaction entre le dihydrogène et le dioxygène est libérée sous forme d'énergie électrique.

b. Ce dispositif convertit de l'énergie chimique en énergie électrique.

3. a. La membrane échangeuse d'ions permet d'éviter le contact direct entre les deux réactifs, empêchant ainsi un transfert direct des électrons.

b. Il est nécessaire de laisser passer les protons afin de permettre leur réaction avec le dioxygène et les électrons, mais pas le dihydrogène ou le dioxygène, afin d'éviter la réaction directe.

c. Les membranes actuelles ont une durée d'utilisation faible et sont d'une grande fragilité mécanique.

d. Les membranes en polymère organique ont une plus grande durée de vie et un meilleur rendement que celles utilisées actuellement. Elles peuvent donc pallier leurs inconvénients.

4. La combustion du dihydrogène est une réaction rapide libérant de l'énergie sous forme thermique, alors que l'oxydation du dihydrogène dans une pile à combustible permet une libération contrôlée de l'énergie, sous forme électrique.

► Activité 3 p. 56

L'activité 3 présente le mode de production du dihydrogène le plus communément utilisé actuellement. Cette technique expérimentale a été mise au point il y a plus de 200 ans, dès la mise au point des premières piles par Alessandro Volta. Elle a notamment servi à confirmer les travaux d'Antoine Lavoisier sur la nature de l'eau.

Cette activité fait appel au savoir-faire expérimental des élèves, leur demandant d'imaginer un protocole expérimental qu'ils mettent en œuvre pour produire du dihydrogène et du dioxygène. Cette séance est également l'occasion de réinvestir la notion de test caractéristique, avec la caractérisation des deux gaz formés.

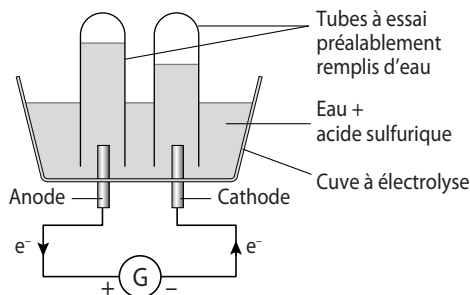
On peut faire le lien entre les volumes relatifs des gaz formés et l'équation de la réaction. De même, le lien est fait entre le fonctionnement de la pile (activité 2) et l'électrolyse, en montrant qu'il s'agit d'une même réaction ayant lieu dans le sens direct ou indirect selon le cas, produisant de l'énergie électrique dans le cas de la pile, et en consommant dans le cas de l'électrolyse. L'activité peut être conclue par une discussion sur l'origine de l'énergie nécessaire à l'électrolyse de l'eau : elle est actuellement majoritairement dépendante du pétrole. La pile à combustible n'est donc pas si propre que cela, à moins de trouver d'autres moyens de production du dihydrogène.

Cette activité sert éventuellement à préparer les élèves aux ECE de fin d'année.

Elle pourra faire l'objet de la rédaction d'un compte-rendu. La conclusion de l'activité permettra, à travers une discussion avec les élèves, d'introduire la dernière activité de ce chapitre.

✓ Réponses aux questions

1.

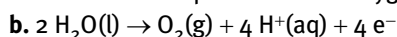


2. Une réduction correspond à un gain d'électrons. L'électrode où a lieu la réduction est donc celle reliée à la borne négative du générateur.

Une oxydation correspond à une perte d'électrons. L'électrode où a lieu l'oxydation est donc celle reliée à la borne positive du générateur.

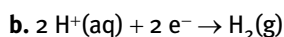
3. a. Le gaz qui se forme à l'anode est le dioxygène.

Le dioxygène est mis en évidence en approchant une bûchette incandescente de l'ouverture du tube à essais. En présence de dioxygène, l'incandescence se ravive.

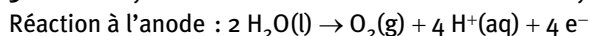


4. a. Le gaz qui se forme à la cathode est le dihydrogène.

Le dihydrogène est mis en évidence en approchant une allumette enflammée de l'ouverture du tube à essais. En présence de dihydrogène, on entend alors une petite détonation, qui souffle l'allumette.



5. L'électrolyse de l'eau consiste en une réaction d'oxydoréduction.



Réaction à la cathode : $2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$

Réaction globale : $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2(\text{g})$

6. Ce processus nécessite la présence d'un générateur qui fournit l'énergie nécessaire à sa réalisation. Il est donc consommateur d'énergie.

► Activité 4 p. 57

Cette activité présente plusieurs modes de production du dihydrogène non dépendants du pétrole. Présentant globalement un bilan carbone neutre, voire positif dans certains cas, ils n'en sont cependant encore qu'au stade expérimental. Cette activité donne l'occasion de répéter l'importance de la recherche face aux échéances qui nous attendent dans un futur proche, ainsi que de la nécessité croissante d'une approche interdisciplinaire face à une problématique.

✓ Réponses aux questions

1. Réaction à l'anode : $4 \text{HO}^-(\text{aq}) \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g}) + 4 \text{e}^-$

Réaction à la cathode : $2 \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2 \text{HO}^-(\text{aq})$

2. Cette technique de production du dihydrogène est peu coûteuse et utilise des métaux abondants.

3. Cette technique utilise un dispositif encombrant et fait appel à de l'énergie issue de combustibles fossiles.

4. Les principales étapes de production du dihydrogène à partir de la biomasse sont la pyrolyse à haute température, suivie de l'élimination du monoxyde de carbone produit en même temps que le dihydrogène.

5. L'électrolyse de l'eau nécessite l'utilisation de combustibles fossiles dont la combustion libère des gaz à effet de serre, dont le dioxyde de carbone. Le bilan carbone de ce processus est négatif.

L'utilisation de la biomasse libère également du dioxyde de carbone. Cependant, contrairement aux combustibles fossiles, la quantité de dioxyde de carbone libérée correspond à celle captée par photosynthèse par les plantes à l'origine de la biomasse. Le bilan carbone est donc neutre.

D. Déroulement du cours

On peut compter pour ce chapitre deux séances d'activités expérimentales.

Exemple de progression :

Séance d'activité documentaire • Activités 1 et 2 (2 h : 30 min d'introduction ; 1 h de travail sur les activités 1 et 2 ; 15 min de correction ; 15 minutes de discussion).

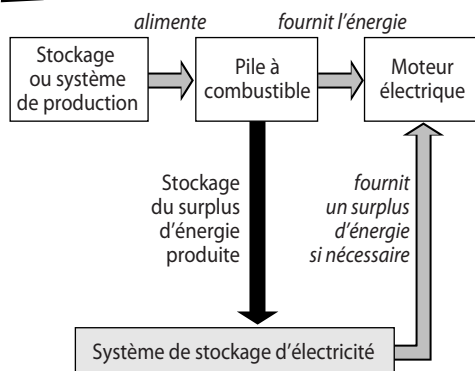
Séance de TP • Activité 3 (1 h).

Séance d'activité documentaire • Activité 4 (1 h).

E. Réponses aux exercices p. 60

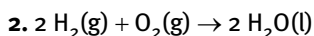
Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 205.

5 1 et 2.



2. Le système de stockage d'électricité permet d'emmagasiner de l'énergie afin de pouvoir fournir un surplus d'énergie lorsque c'est nécessaire.

6 1. La combustion du dihydrogène libère de l'énergie sous forme de lumière, utilisée dans l'éclairage au gaz.



3. D'après le texte, le dihydrogène qui arrive aux becs de gaz n'est pas pur, mais fait partie d'un mélange contenant notamment des sulfures, à l'odeur nauséabonde.

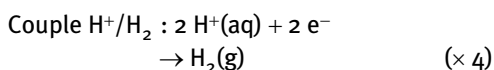
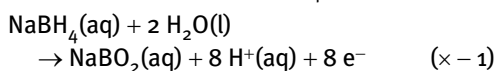
4. Pour réduire les odeurs désagréables d'une lampe fonctionnant au gaz de houille, on peut faire passer le gaz à travers une solution basique. Le sulfure de dihydrogène est alors dissous sous sa forme basique.

7 1. Le dihydrogène est formé lors de la thermolyse.

2. Le dihydrogène est séparé des autres gaz lors de la purification.

3. Les autres gaz servent à produire de la chaleur ou de l'électricité, ou sont utilisés en tant que carburant sous la forme de gaz liquéfié.

8 1. Couple $\text{NaBO}_2/\text{NaBH}_4$:



L'équation de la réaction est obtenue par combinaison linéaire des deux demi-équations redox.

Cette réaction met en jeu un transfert d'électrons entre le tétrahydruoborate de sodium et l'eau. Il s'agit donc bien d'une réaction d'oxydoréduction.

2. La quantité de dihydrogène stockée dépend de la concentration en tétrahydruoborate de sodium. Plus cette concentration est élevée, plus la quantité de dihydrogène disponible est grande.

3. Les avantages de ce moyen de stockage sont le fait que l'ion tétrahydruoborate est présent en solution aqueuse, facilement stockable et transportable, et que le métaborate de sodium formé est soluble dans l'eau, non toxique et facilement recyclable en tétrahydruoborate de sodium.

9 1. L'intérêt de ne pas utiliser d'électrolyte liquide est qu'il n'y a aucun risque de fuite.

2. L'électrolyse PEM met en jeu un dispositif compact et ses performances sont élevées.

3. Les domaines sous-marin et spatial mettent en jeu des espaces clos. L'électrolyse PEM permet dans ce cas de produire du dihydrogène, source d'énergie, mais aussi du dioxygène, qui permet de garder une proportion constante de dioxygène dans l'air.

10 1. Pour liquéfier du dihydrogène, il faut le placer à très basse température (20,3 K). Pour pouvoir le stocker et le transporter, il faut alors un dispositif capable de maintenir le dihydrogène à cette température.

2. L'état liquide est un état compact, alors que l'état gazeux est un état dispersé. À une même pression, une même quantité de matière de dihydrogène occupe un volume beaucoup plus petit à l'état liquide qu'à l'état gazeux.

3. La cryogénisation permet de réduire le volume de stockage d'une quantité donnée de dihydrogène.

11 1. Cette pile est dite « stationnaire » car elle n'est pas mobile (contrairement aux piles « embarquées » des véhicules ou des appareils portables) et alimente une zone géographique limitée.

2. Le réacteur chimique sert à la production du dihydrogène.

3. Cette pile fournit de l'énergie électrique et de l'énergie thermique.

4. L'intérêt d'un tel dispositif est de fournir un quartier en électricité et en chaleur en limitant la consommation de combustibles fossiles (gaz naturel) à la seule production du dihydrogène.

12 1. L'hydrogène peut être considéré comme une source inépuisable car il peut être

obtenu à partir d'eau, en très grande quantité sur Terre.

2. On peut obtenir de la lumière à partir de dihydrogène par sa combustion.

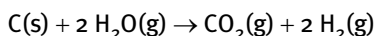
3. On peut produire de la chaleur à partir de dihydrogène soit par sa combustion, soit en récupérant l'énergie thermique libérée lors de son oxydation dans une pile à combustible.

4. Dans les deux processus, le dioxygène intervient en tant qu'oxydant (sous la forme de comburant dans le premier processus).

F. Réponses aux sujets BAC p. 62-64

13 1. Le gaz carbonique correspond au dioxyde de carbone.

L'équation de la réaction présentée dans le document 2 est :



2. **Erratum** : pour cette question, il faut lire : « Comparer les masses molaires de l'oxygène et du dihydrogène [...] ».

$$M(\text{H}_2) = \frac{1}{9} M(\text{H}_2\text{O}) ; M(\text{O}) = \frac{8}{9} M(\text{H}_2\text{O}).$$

Or $m(\text{H}_2) = 9$ grains, $m(\text{O}) = 75$ grains et $m(\text{H}_2\text{O}) = 84$ grains. On retrouve à peu près les mêmes proportions :

$$\frac{m(\text{O})}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{75}{84} = 0,89 = \frac{m(\text{O})}{m(\text{H}_2\text{O})},$$

$$\text{et } \frac{m(\text{H}_2)}{m(\text{H}_2\text{O})} = \frac{9}{84} = 0,11 = \frac{M(\text{H}_2)}{M(\text{H}_2\text{O})}.$$

Les mesures de Lavoisier semblent donc cohérentes.

3. $m(\text{O}) = 135 - 15 = 120$ grains. 120 grains d'oxygène semblent avoir été transférés de l'eau au fer.

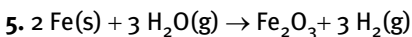
$$\frac{m(\text{O})}{m(\text{Fe}_x\text{O}_y)} = \frac{120}{394} = 0,30 = \frac{yM(\text{O})}{xM(\text{Fe}) + yM(\text{O})}$$

$$\frac{m(\text{Fe})}{m(\text{Fe}_x\text{O}_y)} = \frac{274}{394} = 0,70 = \frac{xM(\text{Fe})}{xM(\text{Fe}) + yM(\text{O})}$$

$$\text{D'où : } 11,2x = 16,8y, \text{ soit } \frac{x}{y} = \frac{3}{2}.$$

L'oxyde obtenu serait donc Fe_2O_3 .

4. Le gaz formé est 14 à 15 fois plus léger que l'air, donc sa masse molaire (en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) est comprise entre $\frac{29}{15}$ et $\frac{29}{14}$, soit environ $2 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$. Le gaz formé est du dihydrogène.



$$\textbf{14} \text{ 1. a. } n(\text{H}_2) = \frac{V(\text{H}_2)}{V_M} = \frac{120 \cdot 10^3}{24,0} = 5,00 \cdot 10^3 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}.$$

$$\text{b. } m(\text{H}_2) = n(\text{H}_2)M(\text{H}_2) = 10,0 \cdot 10^3 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} = 10,0 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}.$$

$$\text{c. } \Delta t = \frac{m_{\text{réservoir}}}{m(\text{H}_2)} = \frac{1 \ 350}{10,0} = 135 \text{ h}.$$

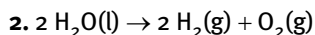
$$\begin{aligned} \text{d. } N_{\text{véhicule}} &= \frac{(m_{\text{réservoir}} + m_{\text{produit}})}{m_{\text{véhicule}}} = \frac{(1 \ 350 + 10,0 \times 24)}{4,0} \\ &= 4,0 \cdot 10^2 \text{ véhicules par jour.} \end{aligned}$$

2. Une telle centrale ne fait appel qu'à des sources d'énergie renouvelable pour la production du dihydrogène. Elle peut donc être considérée comme propre.

3. La capacité des réservoirs permet de ravitailler environ 400 véhicules par jour, ce qui correspond à la fréquentation d'une petite station-service. Cependant, la durée de remplissage des réservoirs est encore beaucoup trop grande pour qu'un tel projet soit actuellement réalisable. Il faudrait parvenir à augmenter la vitesse

de production de l'électrolyseur, afin de réduire la durée de remplissage à moins de 24 h.

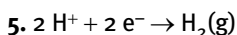
15 1. Les modes actuels de production du dihydrogène sont l'électrolyse basique de l'eau et la pyrolyse de la biomasse.



3. L'électrolyse de l'eau fait appel à des combustibles fossiles comme source d'énergie. Son bilan carbone est donc négatif. De même pour la pyrolyse de la biomasse : si la réaction en elle-même présente un bilan carbone neutre, l'ensemble du processus fait encore appel à des combustibles fossiles.

La solution envisagée pour pallier ces inconvénients est de produire le dihydrogène biologiquement, par photosynthèse.

4. La production du dihydrogène par photosynthèse consiste à placer des algues judicieusement choisies (possédant une enzyme appelée hydrogénase) dans des conditions particulières (milieu de culture dénué de soufre). Celles-ci passent alors de la production de dioxygène (photosynthèse classique) à la production de dihydrogène.



6. La bioproduction du dihydrogène est encore au stade expérimental. En effet, l'hydrogénase est fortement sensible au dioxygène dégagé en parallèle lors de la biophotolyse de l'eau. Il faut donc parvenir à empêcher le contact de l'hydrogénase avec le dioxygène au cours du processus.

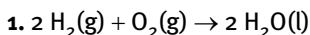
G. Science et société p. 65

Métiers. Ingénieur en traitement de surface

1. Voir www.onisep.fr/Ressources/Univers-Formation/Formations/Post-bac/BTS-Traitement-des-matériaux-option-B-traitements-de-surfaces

2. La corrosion est le fait que les matériaux dont sont constituées les électrodes s'oxydent au contact de l'eau ou du dioxygène de l'air. Le rendement du dispositif employant ces électrodes peut alors être très fortement diminué.

Technologie. Du dihydrogène pour remplacer l'essence



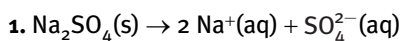
2. Ce processus est non polluant car il ne produit que de l'eau.

3. Le dihydrogène étant explosif, son stockage doit être prévu pour éviter les chocs potentiellement dangereux. De plus, il s'agit d'un gaz très volatil. Le circuit d'alimentation du moteur doit donc être adapté. Tout cela entraîne une faible capacité de stockage et un surpoids fortement pénalisants en matière d'autonomie.

H. Compléments pédagogiques

Les énoncés sont disponibles sur www.libtheque.fr/physiquechimie.lycee

► Corrigé

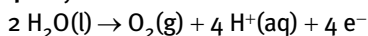


2. D'après l'équation de dissolution du sulfate de sodium solide dans l'eau, on a :

$$[\text{Na}^+] = 2c = 2 \times 1,0 = 2,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$
$$\text{et } [\text{SO}_4^{2-}] = c = 1,0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

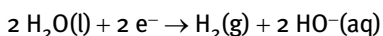
3. Dans le circuit extérieur, les électrons circulent de la borne négative du générateur vers la cathode, et de l'anode vers la borne positive du générateur.

4. Oxydation à l'anode :



(perte d'électrons).

Réduction à la cathode :



(gain d'électrons).

5. Les ions Na^+ et SO_4^{2-} sont des ions spectateurs, qui assurent l'électroneutralité des solutions à l'anode et à la cathode.

6. Il y a formation d'ions H^+ à l'anode. La solution s'acidifie donc et prend une couleur jaune.

Il y a formation d'ions HO^- à la cathode. La solution devient donc basique et prend une couleur bleue.

7. D'après les réactions à l'anode et à la cathode, il y a deux fois plus d'ions H^+ que d'ions HO^- qui ont été formés. La teinte finale de la solution obtenue est donc jaune.

I. Bibliographie

- ✓ P. Papon, *L'énergie, à l'heure des choix*, Belin, coll. « Regards », 2007.
- ✓ M. Boudellal, *La pile à combustible. Structure-Fonctionnement-Applications*, Dunod-L'Usine Nouvelle, 2007.
- ✓ P. Odru, *Le stockage de l'énergie*, Dunod-ADEME, 2010.
- ✓ F. Roby, *Vers la voiture sans pétrole ?*, EDP Sciences, 2006.
- ✓ Site internet de l'AFHYPAC (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible) : www.afhypac.org
- ✓ « Énergies à volonté », *Pour la Science*, dossier n° 69, oct.-déc. 2010.
- ✓ V. Artero, N. Guillet, D. Fruchart et M. Fontecave, « L'hydrogène : une énergie propre pour demain ? », *Pour la Science*, n° 405, juil. 2011.

Chapitre 5

LES INSTRUMENTS DE MUSIQUE

A. Le programme

Thème 2 : Son et musique

Domaine d'étude	Mots-clés
Instruments de musique	• Instruments à cordes • Instruments à vent • Instruments à percussion • Gamme • Harmonie • Acoustique musicale

✓ **Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties**

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

B. La démarche adoptée dans le manuel

La démarche adoptée dans ce chapitre est d'insister sur la compréhension des phénomènes vibratoires et de résonance à partir d'une démarche expérimentale, en s'appuyant sur l'étude des instruments de musique. L'importance d'accorder le résonateur à l'excitateur est ensuite mise en évidence.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► **Vérifier ses acquis** p. 68

✓ **Réponses aux questions**

- Un son est une onde mécanique longitudinale périodique, de fréquence comprise entre 20 et 20 000 Hz.
- La chaîne de propagation est la suivante.

1. Mise en vibration du diapason à l'aide d'une percussion sur l'une de ses branches.
2. Transmission de la vibration à l'air environnant le diapason par l'intermédiaire de la caisse de résonance. Création de l'onde sonore.
3. Propagation de l'onde sonore dans l'air, de proche en proche, du diapason jusqu'à la membrane du microphone.

4. Mise en vibration de la membrane du microphone.

5. Conversion de la vibration en signal électrique, transmis à l'oscilloscope.

– La période T d'un son est la durée (en secondes) au bout de laquelle le signal se reproduit identique à lui-même.

La fréquence F (en Hertz), d'un son correspond au nombre de périodes par seconde. $F = 1/T$.

► S'interroger p. 68

Le sillage du bateau montre des perturbations à la surface de l'eau, toutes séparées d'une même distance. Cette distance séparant deux perturbations est égale à la longueur d'onde λ du phénomène périodique à l'origine des perturbations.

► Activité 1 p. 70

Cette activité est consacrée à l'étude d'une onde stationnaire sur une corde tendue et met en évidence l'origine d'un son produit par les instruments à cordes. Les paramètres dont dépend la hauteur du son créé par l'excitateur sont déterminés (longueur, tension et masse linéique de la corde).

On pourra mettre en évidence le lien entre la vitesse de propagation v d'une onde mécanique sur une corde, et les notions d'inertie (masse linéique) et de rigidité (tension) : $v = \sqrt{\frac{\text{rigidité}}{\text{inertie}}}$.

✓ Réponses aux questions

1. Les éléments d'une guitare participant à la formation d'une onde sonore sont : les cordes ; le chevalet ; la table ; la caisse.

2. Chacun de ces éléments a un rôle :

- les cordes sont l'excitateur, à l'origine de la vibration ;
- le chevalet et la table transmettent la vibration à la caisse ;
- la caisse est le résonateur, qui amplifie la vibration et forme l'onde sonore.

3. La corde est le siège d'ondes stationnaires seulement à certaines fréquences du vibreur.

4. a. La fréquence F_1 du vibreur lorsque l'onde présente un fuseau dépend de la tension de la corde, de sa masse linéique et de sa longueur.

Pour un fuseau, la longueur de la corde L vérifie $L = \frac{\lambda}{2}$, soit $L = \frac{c}{2F}$ avec $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$, T est la tension

de la corde et μ la masse linéique. D'où $F = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$.

Corde de Mi : $F_1 = 82,4$ Hz ; $T = 88,1$ N ; $\mu = 9,0$ g · m⁻¹.

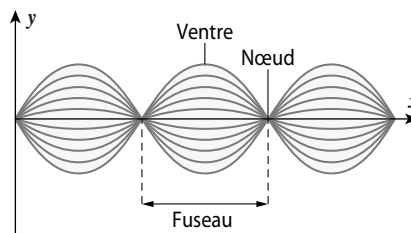
Corde de La : $F_1 = 110$ Hz ; $T = 127,7$ N ; $\mu = 11,4$ g · m⁻¹.

Corde de Ré : $F_1 = 146,8$ Hz ; $T = 134,75$ N ; $\mu = 3,8$ g · m⁻¹.

b. $F_2 = 2F_1$; $F_3 = 3F_1$; $F_4 = 4F_1$.

c. $F_n = nF_1$.

5. a. Schéma légendé de la corde pour $n = 3$:



b. $L = nd_n$.

6. La longueur d_n diminue lorsque la fréquence F_n augmente.

D'après le schéma, $d_n = \frac{\lambda_n}{2}$.

Or $\lambda_n = \frac{v}{F_n}$, donc $d_n = \frac{v}{2F_n}$.

► Activité 2 p. 71

Erratum : pour l'abscisse du doc. 5, la fréquence est exprimée en Hz et non en kHz.

L'activité 2 met en évidence l'importance du résonateur dans un instrument de musique. En effet, tout instrument de musique, quelle que soit sa nature, est constitué d'un excitateur *et* d'un résonateur. On montre notamment que la fréquence de résonance d'un oscillateur soumis à des oscillations forcées est égale à sa fréquence propre de vibration.

Il sera nécessaire de distinguer fréquence propre et fréquence de résonance.

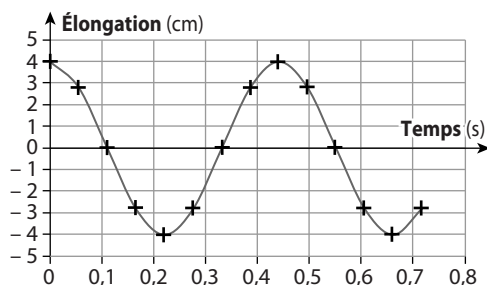
La fréquence propre d'un oscillateur est la fréquence à laquelle il oscille librement lorsqu'on le place hors équilibre ; la fréquence de résonance est la fréquence pour laquelle les oscillations sont maximales lorsque l'oscillateur est soumis à des oscillations forcées, imposées par un excitateur extérieur.

Dans le cas d'un instrument à cordes, les cordes vibrent à leur fréquence propre. En revanche, l'air contenu dans un tuyau sonore ne vibre qu'à la fréquence de résonance du tuyau (voir activité 3, p. 72 du manuel).

De nombreux exemples illustrent ce phénomène. Des vidéos montrent, par exemple, des balançoires fantômes, dont la plus célèbre est la balançoire de Firmat, en Argentine. On peut également mentionner l'effondrement, en 1850, du pont de Basse-Chaîne, à Angers, à l'origine de la loi qui impose aux troupes militaires de rompre les rangs en traversant un pont.

✓ Réponses aux questions

1. a.



b. $T_0 = 0,44 \text{ s}$.

2. $T_{th} = 2\pi\sqrt{\frac{0,10}{20}} = 0,44 \text{ s} = T_0$. La valeur mesurée est cohérente avec la valeur théorique.

$F_0 = \frac{1}{T_0} = 2,3 \text{ Hz}$.

3. Dans un premier temps, la vitesse de la masse à son passage en $x = 0$ augmente avec la fréquence, jusqu'à une valeur maximale pour une fréquence appelée fréquence de résonance. Au-delà de cette fréquence de résonance, la vitesse de la masse diminue à nouveau.

4. Par lecture graphique, la fréquence de résonance de l'oscillateur est $F_r = 2,3 \text{ Hz}$.

5. La fréquence propre de l'oscillateur libre est égale à la fréquence de résonance de l'oscillateur forcé ayant les mêmes caractéristiques. Un oscillateur entre donc en résonance à une excitation de fréquence égale à sa fréquence propre.

► Activité 3 p. 72

L'activité 3 propose l'étude de l'influence de la forme de la caisse de résonance sur sa fréquence de résonance. La première approche présentée ici, sur des formes géométriques simples (tuyau sonore d'un instrument à vent), permet de montrer que l'un des paramètres mis en jeu est la longueur caractéristique du tuyau sonore.

Puis dans la partie B, la nature de l'onde amplifiée par la caisse de résonance est mise en évidence. Il s'agit d'une onde stationnaire, tout comme la vibration d'une corde dans le cas d'un instrument à cordes.

✓ Réponses aux questions

1. L'expérience met en évidence que la plus petite fréquence pour laquelle le son obtenu est maximal est différente pour chacun des tubes étudiés, donc cette fréquence dépend de la longueur du tube.

2. Cette fréquence diminue lorsque la longueur du tube augmente.

3. Le son est important pour d'autres fréquences que la fréquence la plus basse. Ces fréquences sont toutes des multiples entiers de cette dernière.

4. a. Tout comme une corde tendue entre deux points fixes, le tuyau sonore présente des fuseaux constitués de ventres (visualisés par une accumulation de la poudre de lycopode) équidistants, séparés par des nœuds (absence de poudre de lycopode) également équidistants.

b. Le tuyau sonore photographié ici présente sept fuseaux. Le mode excité est le mode de rang $n = 7$.

$$F_1 = \frac{F_n}{n}.$$

5. Soumis à une oscillation périodique de période T , un point d'une corde vibre au cours du temps à la même période T , tout comme le fait une tranche d'air dans un tuyau soumis à une excitation de période T .

6. Cette phrase indique la différence de nature entre une onde dans un tuyau sonore, longitudinale (la vibration d'une couche d'air s'effectue dans la direction du tuyau), et une onde sur une corde, transversale (un point de la corde vibre dans la direction perpendiculaire à la corde).

$$7. v = \lambda_n F_n = \left(\frac{2L}{n} \right) F_n, \text{ D'où } L = \frac{nv}{2F_n}.$$

8. Un orgue possède des tuyaux de longueurs différentes pour pouvoir émettre des sons de fréquences propres différentes.

► Activité 4 p. 73

L'activité 4 fait le lien entre la physique (constitution et forme d'un instrument de musique) et la musique. Les instruments de musique ont été construits de façon à émettre des sons « harmonieux », dont l'écoute est agréable à l'oreille. Ces sons ont été organisés dans un premier temps de façon subjective, « à l'oreille », pour construire des gammes musicales à l'origine des œuvres musicales que nous apprécions tous. Une étude de ces gammes, notamment de la hauteur des notes les constituant, était matériellement impossible à l'époque où ces gammes ont été construites. Cependant, elles montrent que derrière cette construction intuitive se cache une logique mathématique, chaque note étant liée aux autres par un rapport de proportionnalité cohérent, quel que soit l'intervalle (octave, quinte, tierce, etc.) étudié.

✓ Réponses aux questions

1. $T_0 = 2,3 \text{ ms}$. D'où $F_0 = \frac{1}{T_0} = 440 \text{ Hz}$.

2. La désignation « 440 » indique la fréquence du son émis, plus précisément la fréquence de son mode fondamental.

3. Harmonique 2 : $F_2 = 2F_0 = 880$ Hz ;

harmonique 3 : $F_3 = 3F_0 = 1\,260$ Hz ;

harmonique n : $F_n = nF_0$.

4. Un son est dit « harmonieux » lorsqu'il paraît juste à l'oreille.

5. Une octave est l'intervalle de fréquences tel que la fréquence maximale est le double de la fréquence minimale de l'intervalle.

Une octave est découpée en douze demi-tons, on peut donc définir un demi-ton comme l'intervalle de fréquence $[F_n ; F_{n+1}]$ tel que $F_{n+1} = 2^{1/12}F_n$.

6.

Note	F (Hz)
Do ₃	261,63
Do#	277,19
Ré	293,67
Ré#	311,13
Mi	329,63
Fa	349,23
Fa#	370,00
Sol	392,00
Sol#	415,31
La	440,00
La#	466,17
Si	493,89
Do ₄	523,26

7. Par exemple :

– une quinte est un intervalle de fréquences tel que la fréquence maximale est égale à 1,5 fois la fréquence minimale ;

– une quarte est un intervalle de fréquences tel que la fréquence maximale est égale à 4/3 de la fréquence minimale.

8. La gamme tempérée est construite sur une octave, soit un intervalle de fréquence tel que la fréquence maximale est le double de la fréquence minimale. L'octave est découpée en 12 intervalles égaux appelés demi-tons, qui permettent de définir 12 notes ; on passe d'une note à la note suivante en multipliant sa fréquence par $2^{1/12}$.

D. Déroulement du cours

On peut compter pour ce chapitre trois séances d'activités et une séance récapitulative.

Exemple de progression :

Travail à la maison • Activité 1A, en préparation de la première séance.

Séance de TP • Activité 1B, suivie des exercices 6, 8 et 10.

Séance de TP • Activité 2.

Séance de TP • Activité 3.

Travail à la maison • Activité 4.

La séance suivante sera mise à profit pour récapituler les notions acquises et à faire quelques exercices afin de s'assurer que la formation d'un son et l'influence des différents paramètres sur sa nature sont bien assimilées. Il est en effet indispensable que ces notions soient acquises afin que les élèves puissent assimiler la modification des caractéristiques d'un son et sa reproduction électronique dans le chapitre 6.

E. Réponses aux exercices p. 76-77

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 206.

6 1. Le tympanon est un instrument à cordes (frappées).

2. Les paramètres qui permettent d'émettre des sons de hauteur différente sont la longueur et la tension des cordes.

3. Sur la photo, on peut apercevoir des clés qui permettent de modifier la tension des cordes.

7 1. Une octave correspond à un intervalle de fréquences tel que la fréquence supérieure de l'intervalle est le double de la fréquence inférieure de l'intervalle.

2. $F(\text{Do}_4) = 2F(\text{Do}_3) = 2 \times 261,6 = 523,2 \text{ Hz}$.

3. Les fréquences des notes intermédiaires sont données dans le tableau ci-dessous.

Note	n	$F_n \text{ (Hz)}$
Do ₃	0	261,6
Do#	1	294,3
Ré	2	331,1
Ré#	3	392,4
Mi	4	441,5
Fa	5	447,0
Fa#	6	478,9
Sol	7	496,6
Sol#	8	502,8
La	9	514,3
La#	10	519,5
Si	11	520,7
Do ₄	12	523,1

8 1. L est inversement proportionnel à F . Si on veut jouer une note de fréquence multipliée par 1,5, il faut diviser sa longueur par 1,5. Il faut donc appuyer la corde sur le manche aux $2/3$ de sa longueur.

2. $F(\text{Mi}_4) = 1,5F(\text{La}_3) = 660 \text{ Hz}$;

$$F(\text{Ré}_3) = \frac{F(\text{La}_3)}{1,5} = 293 \text{ Hz} ;$$

$$F(\text{Sol}_2) = \frac{F(\text{La}_3)}{1,5^2} = 196 \text{ Hz}.$$

3. On divise la fréquence de chaque note par 1,5. On obtient donc les notes suivantes : Do₂, Sol₂, Ré₃, La₃.

9 1. La hauteur d'un son correspond à la fréquence de son mode fondamental de vibration.

2. La hauteur du son émis par une colonne d'air dépend principalement de la longueur de cette colonne d'air.

3. Le piston a pour effet de modifier la longueur de la colonne d'air.

4. En appuyant sur le piston, le trompettiste augmente la longueur de la colonne d'air, donc la longueur d'onde du mode fondamental. Par conséquent, sa fréquence diminue et donc la hauteur du son diminue.

10 1. $\lambda = 2L = 130 \text{ cm}$.

2. $v = \lambda F = 428,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

D'où $T = v^2\mu = 115 \text{ N}$.

3. a. Si la corde donnant la note la plus grave est de même nature que la corde la plus aiguë, il faut la tendre avec la tension $T = 7 \text{ N}$.

b. La valeur de tension calculée est beaucoup trop faible pour pouvoir être réalisée. Il faut donc changer la composition de la corde.

c. Le fait d'utiliser un cordon en fibre synthétique autour duquel est enroulé un fil métallique très fin permet d'augmenter la masse linéique de la corde sans trop augmenter son diamètre.

11 1. Une oscillation forcée est une oscillation dont la fréquence est imposée par une excitation extérieure.

2. Une onde stationnaire est issue de l'addition de deux ondes parcourant le milieu de propagation en sens contraires. Elle présente n fuseaux, chacun limité par deux nœuds et comprenant un ventre de vibration.

3. Le sable est déplacé par les ventres de vibration, mais est au repos au niveau des nœuds de vibration.

Il s'accumule donc au niveau des nœuds de vibration.

12 1. $F(\text{Mi}_3) = \left(\frac{5}{4}\right) F(\text{Do}_3) = 328 \text{ Hz}$;

$F(\text{Sol}_3) = \left(\frac{3}{2}\right) F(\text{Do}_3) = 393 \text{ Hz}$;

$F(\text{Do}_4) = 2F(\text{Do}_3) = 524 \text{ Hz}$;

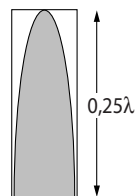
$F(\text{Mi}_4) = 2F(\text{Mi}_3) = 656 \text{ Hz}$.

2. $\lambda(\text{Do}_3) = \frac{v}{F(\text{Do}_3)} = 1,30 \text{ m}$.

De même, $\lambda(\text{Mi}_3) = 1,04 \text{ m}$; $\lambda(\text{Sol}_3) = 0,87 \text{ m}$;

$\lambda(\text{Do}_4) = 0,65 \text{ m}$; $\lambda(\text{Mi}_4) = 0,52 \text{ m}$.

3. La distance entre deux nœuds consécutifs d'une onde stationnaire est égale à sa demi-longueur d'onde. La distance entre un nœud et un ventre est donc égale au quart de sa longueur d'onde.

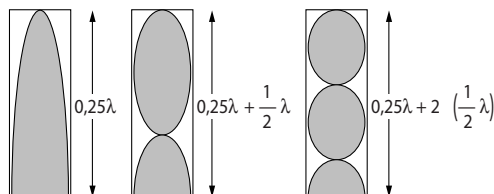


4. $L = \frac{\lambda}{4}$. D'où $L(\text{Do}_3) = 0,32 \text{ m}$;

$L(\text{Mi}_3) = 0,26 \text{ m}$; $L(\text{Sol}_3) = 0,22 \text{ m}$;

$L(\text{Do}_4) = 0,16 \text{ m}$; $L(\text{Mi}_4) = 0,13 \text{ m}$.

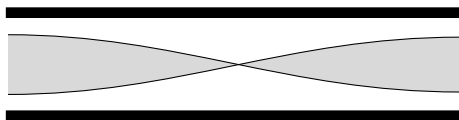
5. Seuls les modes harmoniques impairs d'une note peuvent être présents dans un tube. Le tube présente une extrémité ouverte et une extrémité fermée. Il présente donc nécessairement un ventre à l'ouverture et un nœud à l'autre extrémité. D'où les modes de vibrations possibles :



F. Réponses aux sujets BAC p. 78-79

13 1. Le didjeridoo appartient à la famille des instruments à vent.

2. Schéma d'une colonne d'air avec un fuseau (un nœud de vibration au centre, et un ventre à chacune des extrémités).



$\lambda_1 = 2L = 3,00 \text{ m}$; $F_1 = \frac{v}{\lambda_1} = 113 \text{ Hz}$.

3. Les organes qui produisent la voix sont le larynx et les cordes vocales. Les organes qui modulent la voix constituent l'ensemble bucco-nasal.

4. Les lèvres du joueur de didjeridoo jouent le même rôle que les cordes vocales pour produire le son, qui est alors amplifié par l'instrument.

L'onde sonore ainsi créée est appelée bourdon.

5. Le joueur de didjeridoo peut moduler les sons émis par son instrument en jouant sur le positionnement de sa langue et la forme de ses joues.

14 1. Dans un violon, les cordes jouent le rôle d'excitateur et la caisse sert de résonateur.

Les cordes créent les vibrations (mode fondamental et modes harmoniques) à l'origine du son, et la caisse amplifie ce son avant de le transmettre à l'air ambiant.

2. $v = \lambda F$.

$\mu = \frac{T}{v^2} = \frac{T}{\lambda^2 F^2} = \frac{T}{(2L)^2 F^2}$

$= 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} = 15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$.

3. On modifie la hauteur du son émis par une corde en changeant la longueur de cette corde. Pour cela, on plaque la corde contre la touche à l'aide des doigts de la main gauche.

4. Les vibrations sont transmises des cordes à la caisse de résonance par le chevalet et la table d'harmonie.

5. Afin d'avoir un son de bonne qualité, il faut que la table d'harmonie transmette fidèlement les vibrations des cordes à la caisse de résonance. Il est donc indispensable que la forme et la structure de la table d'harmonie soit étudiées, puis réalisées avec le plus grand soin, avec des matériaux judicieusement choisis.

G. Épreuve expérimentale p. 80

Cette épreuve consiste à étudier des ondes stationnaires qui s'établissent dans un tuyau dans lequel l'air est soumis à une onde sonore sinusoïdale, puis à mesurer expérimentalement la célérité du son dans l'air.

Cette mesure conduit à une évaluation de type B de l'incertitude de mesure. Elle permet également de vérifier que l'écriture et la précision du résultat du mesurage ont bien été assimilées.

1.1. Aux extrémités d'un tube fermé, il y a des nœuds de vibration, donc des ventres de pression.

1.2. $\lambda_n = \frac{2L}{n}$.

1.3 $F = \frac{c}{\lambda}$, avec c la célérité du son dans la colonne d'air.

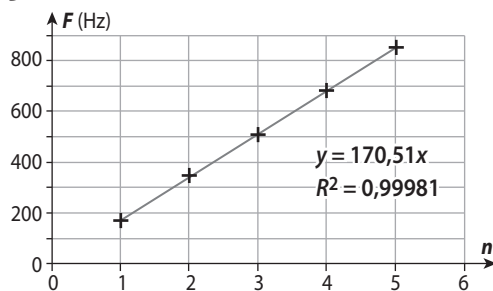
2.1. Placer le microphone à l'extrémité du tube, au niveau de laquelle on trouve un ventre de pression. Augmenter progressivement la fréquence du son émis par le haut-parleur jusqu'à obtenir une valeur extrême de la tension aux bornes du microphone. Si cette valeur est nulle, la tension du microphone est maximale aux nœuds de pression, et si cette valeur est maximale, la tension du microphone est maximale aux ventres de pression.

2.2. Les nœuds de pression sont mis en évidence à l'aide de la tension aux bornes du microscope, visualisée sur l'oscilloscope. En fonction de la nature du microphone, mise en évidence dans la question précédente, les nœuds sont repérés par une tension maximale ou par une tension nulle.

2.3. Pour un tube de 1,0 m de longueur, on obtient les valeurs ci-dessous.

n	F (Hz)
1	168
2	345
3	506
4	683
5	854

3.1.



3.2. La détermination du coefficient directeur de la droite obtenue donne accès à la valeur de a . Ici, $a = 170,5$.

4.1. $a = \frac{c}{2L}$.

4.2. $L = 1,00$ m (ΔL = demi graduation de la règle utilisée pour la mesure).

4.3. $c = a \times 2L$. Ici, $c = 342$ m $\cdot$ s $^{-1}$.

4.4. La valeur obtenue est à comparer à la valeur théorique de 340 m $\cdot$ s $^{-1}$.

Cette comparaison se fait en calculant l'écart relatif :

$$\left| \frac{c_{\text{théorique}} - c_{\text{exp}}}{c_{\text{théorique}}} \right|.$$

Visite d'un musée. Histoire et musique

1. Les principales familles d'instruments sont les instruments à cordes, les instruments à vent et les instruments à percussion.

2. Le Sella est un luth, ancêtre de la guitare. Il s'agit donc d'un instrument à cordes.

Le Stradivarius est un violon. Il s'agit donc d'un instrument à cordes.

Le Sax est un saxophone. Il s'agit donc d'un instrument à vent.

3. Quelques exemples.

– Les *negro spirituals* trouvent leur origine dans les « work songs » que chantaient les esclaves pour rythmer le travail pénible dans les champs en Amérique du Nord.

– Le *punk rock* a débuté dans les années 1970 ; il s'agit à l'origine d'un mouvement de rébellion d'une partie de la jeunesse britannique.

– L'euphorie de l'après Seconde Guerre mondiale est à l'origine du *bebop*, joué dans les caveaux de Saint-Germain des Prés à Paris.

Métier. Rencontre avec un luthier

1. Voir, par exemple, sur le site www.onisep.fr

2. La forme d'un instrument lui est imposée par les fréquences que l'on souhaite amplifier. Pour pouvoir reconnaître leur sonorité, les guitares doivent toutes amplifier les mêmes fréquences, d'où des formes sensiblement identiques.

I. Compléments pédagogiques

L'énoncé est disponible sur www.libtheque.fr/physiquechimie.lycee

► Corrigé

1. L'excitateur est le souffle dans le goulot de la bouteille.

2. Le résonateur est l'air compris dans l'espace entre la surface du liquide et le goulot de la bouteille.

3. La hauteur de liquide présent dans la bouteille a une influence sur les fréquences

amplifiées par la bouteille, et donc sur les fréquences transmises à l'air ambiant. La hauteur du son transmis dépend donc de la hauteur du liquide présent dans la bouteille.

4. Lorsqu'on augmente la hauteur du liquide dans la bouteille, on diminue la longueur de la colonne d'air formée par la bouteille. Par conséquent, la longueur d'onde de résonance diminue et la fréquence de résonance augmente. La hauteur du son émis par la bouteille augmente donc, il est de plus en plus aigu.

J. Bibliographie

- ✓ Une vidéo intéressante : *La physique du violoncelle*, conférence de Pierre Encrenaz, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris (2002), visible sur le site www.canal-u.tv/video/science_en_cours/la_physique_du_violoncelle_2002.64
- ✓ A. Chaigne et J. Kergomard, *Acoustique des instruments de musique*, Belin, 2008.
- ✓ J.-C. Risset, *Les instruments de l'orchestre*, Belin-Pour la Science, 1995.
- ✓ A. Schuhl et J.-L. Schwartz, *La Musique est-elle une science ?*, Le Pommier, 2005.
- ✓ G. Fain, *Comment entendons-nous ?*, Le Pommier, 2012.
- ✓ « Son et musique », *Pour la Science*, numéro spécial 373, nov. 2008.
- ✓ « Le monde des sons », *Pour la Science*, dossier n° 32, 2001.

Chapitre 6

LE SON ET SON TRAITEMENT

A. Le programme

Thème 2 : Son et musique

Domaine d'étude	Mots-clés
Instruments de musique	• Instruments à corde • Traitement du son • Instruments électroniques

✓ **Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties**

- Réaliser l'analyse spectrale d'un son musical, l'exploiter pour en caractériser la hauteur et le timbre.
- Utiliser des circuits électriques pour modifier un signal afin d'établir une analogie avec le traitement du son

B. La démarche adoptée dans le manuel

Ce chapitre démarre par l'analyse d'un son produit par un instrument classique, afin de pouvoir le modéliser mathématiquement. Une fois décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux, ce son est alors plus aisément modifiable ou reproductible, à l'aide de montages électriques simples.

Ce chapitre est également l'occasion de revenir sur les notions fondamentales de l'électricité, et d'introduire les notions de filtres et d'oscillateurs électriques.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► **Vérifier ses acquis** p. 82

✓ **Réponses aux questions**

- La hauteur d'un son correspond à la fréquence de son mode fondamental de vibration.
- L'analyse spectrale d'un son consiste à identifier les différents modes de vibration constituant ce son (mode fondamental et modes harmoniques), ainsi que l'amplitude relative de chacun d'eux.
- Le timbre est défini par le nombre des harmoniques qui constituent le spectre du son émis et par leur amplitude respective.
- Deux instruments de musique jouant la même note se distinguent par leur timbre.

► S'interroger p. 82

Ces sonagrammes indiquent les harmoniques participant au timbre du son, ainsi que leur durée. On connaît donc la fréquence et la durée des harmoniques qu'il faudra créer électroniquement pour synthétiser la note souhaitée.

► Activité 1 p. 84

Cette activité explique progressivement l'analyse spectrale d'un signal périodique. Elle met en évidence la décomposition d'un son complexe périodique en une somme de signaux sinusoïdaux, chacun d'entre eux correspondant à un mode de vibration du son.

Cette modélisation d'un son et l'analyse spectrale qui en est faite constituent le fondement du principe de traitement d'un son.

✓ Réponses aux questions

1. Les deux courbes tracées ont la même période.
2. La courbe représentative de la fonction g et l'enregistrement du doc. 1 sont identiques.
3. L'analyse spectrale de la note jouée sur une guitare correspond à la somme de plusieurs signaux sinusoïdaux, chacun d'eux modélisant un mode harmonique.
4. Les deux signaux ont le même mode fondamental, donc la même hauteur. La hauteur caractérisant la note jouée, on peut en conclure que ces deux instruments jouent la même note.
5. Ces deux signaux sont différents, car leur timbre, c'est-à-dire l'amplitude relative des différents harmoniques, est différent. On peut remarquer que le spectre de la guitare est beaucoup plus riche en harmoniques que celui du violon.
6. Le pic du spectre qui fournit la hauteur du son est celui de plus basse fréquence : c'est le fondamental.
7. $F_1 = 440 \text{ Hz}$; $F_2 = 1\,320 \text{ Hz}$; $a = 0,55$; $F_3 = 2\,200 \text{ Hz}$; $b = 0,41$.
8. L'analyse fréquentielle permet de mettre en évidence les harmoniques constituant un son, ainsi que l'amplitude relative de ces harmoniques, donc le timbre du son analysé. Le timbre est caractéristique d'un instrument. Cette technique permet donc de distinguer les sons émis par deux instruments différents.

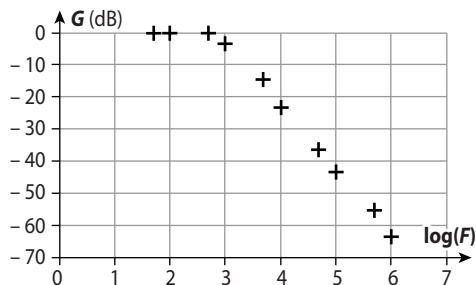
► Activité 2 p. 85

L'activité 2 présente l'étude de circuits électriques simples, comme le filtre passe-bas (R, C) présenté ici. Il est également possible de réaliser la même expérience avec un filtre passe-haut.

Ces filtres ont des applications concrètes dans le traitement des sons, notamment en termes d'effets musicaux ou de nettoyage de bandes sonores.

✓ Réponses aux questions

$F \text{ (Hz)}$	50	100	500	1 000	5 000	10 000	50 000	100 000	500 000	1 000 000
$\log(F)$	1,70	2,00	2,70	3,00	3,70	4,00	4,70	5,00	5,70	6,00
$U_E \text{ (V)}$	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
$U_S \text{ (V)}$	5,96	5,98	5,94	4,10	1,10	0,41	0,09	0,04	0,01	0,004
$G \text{ (dB)}$	-0,06	-0,03	-0,09	-3,31	-14,74	-23,31	-36,48	-43,74	-55,56	-63,52



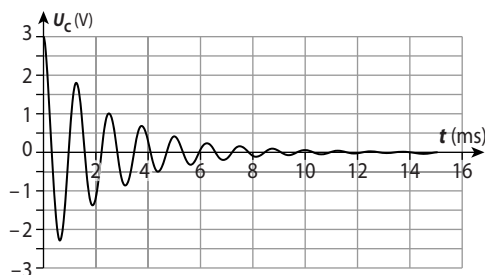
1. $F_{-3\text{dB}} = 1\,000\text{ Hz}$.
2. Ce montage atténue fortement les signaux de fréquence supérieure à 1 000 Hz, sans modifier les signaux de fréquence plus basse. Il s'agit donc d'un filtre passe-bas.
3. Les trois spectres ont la même hauteur (fréquence du mode fondamental), mais des timbres différents (amplitude relative des modes harmoniques).
4. La pédale en position 1 conduit à un spectre avec uniquement les harmoniques de basse fréquence du son d'origine. Cet effet est donc obtenu grâce à un filtre passe-bas.
5. Pour modifier un son sans changer sa hauteur, il suffit de modifier son timbre. Pour cela, on utilise des filtres qui ne modifient pas le fondamental du son, mais uniquement l'amplitude des harmoniques.
6. Pour nettoyer une bande sonore en éliminant les bruits à hautes fréquences, on utilise un filtre passe-bas.

► Activité 3 p. 86

L'activité 3 sert d'introduction aux instruments électroniques. Elle montre comment un signal périodique est produit à l'aide de composants électriques, ici une bobine et un condensateur, et quelle est l'influence sur la fréquence des oscillations de la valeur de l'inductance de la bobine et de celle de la capacité du condensateur. Cette activité introduit également l'effet de la résistance du circuit électrique sur l'amplitude des oscillations obtenues.

✓ Réponses aux questions

L'oscillogramme a l'allure représentée ci-dessous.



1. Le signal obtenu est constitué d'oscillations se répétant à intervalles de temps réguliers, avec toutefois une amplitude qui diminue au cours du temps. Il s'agit donc d'un signal pseudo-périodique.
2. $T = 1,25\text{ ms} = T_0$.
3. Pour $L = 40\text{ mH}$, on a $C = 3,3\text{ }\mu\text{F}$. Pour $C = 1,0\text{ }\mu\text{F}$, on a $L = 0,13\text{ H}$.

4. a. Lorsque la valeur R de la résistance augmente et dépasse la valeur dite « critique », le signal n'est plus pseudo-périodique : il devient apériodique.
- b. *L'élève doit réaliser le même graphe que dans le manuel (doc. 6, p. 86), sans la courbe périodique.*
5. Lorsque la valeur R de la résistance augmente tout en restant inférieure à la valeur critique, la valeur de la pseudo-période des oscillations augmente, alors que l'amplitude des oscillations diminue de plus en plus vite.
6. $R_c = 400 \, \Omega$. Théoriquement, elle est égale à $2\sqrt{\frac{L}{C}}$.
7. Un signal électrique peut être périodique ; un son est une perturbation mécanique périodique.
8. On reproduit électroniquement une note émise par un instrument de musique en additionnant plusieurs signaux électriques périodiques d'amplitude et de fréquence judicieusement choisies. Le timbre de l'instrument souhaité est ainsi modélisé.
9. Les circuits électroniques utilisés doivent posséder une résistance la plus faible possible afin de limiter l'atténuation de l'amplitude du signal créé.

► Activité 4 p. 87

Cette activité est la suite logique des précédentes. Un instrument électronique analogique est constitué de plusieurs oscillateurs électriques de fréquences propres différentes judicieusement choisies. La somme des oscillations créées reproduit le timbre d'un instrument de musique. Aujourd'hui, des circuits électroniques complexes reproduisent de plus en plus fidèlement le son émis par un instrument de musique traditionnel.

NB : les instruments électroniques plus récents, numériques, fonctionnent à partir d'une banque d'enregistrements numérisés d'instruments traditionnels. Ils ne font plus appel à des oscillateurs électriques pour reproduire un son, mais à une combinaison des échantillons de leur banque de données.

✓ Réponses aux questions

- Un montage électrique permettant de jouer le rôle d'oscillateur est un circuit LC .
- Un montage électrique permettant de jouer le rôle de filtre est un circuit RC .
- Attaque : moment où l'on appuie sur la touche du piano.
Chute : moment où l'on relâche la touche du piano.
Maintien : durée pendant laquelle l'amplitude du son émis est constante.
Extinction : diminution progressive de l'amplitude du son émis, jusqu'à annulation.
- Le générateur d'enveloppe simule l'évolution de l'amplitude du son émis par l'instrument en fonction du temps.
-



D. Déroulement du cours

On peut compter pour ce chapitre deux séances d'activités.

Exemple de progression :

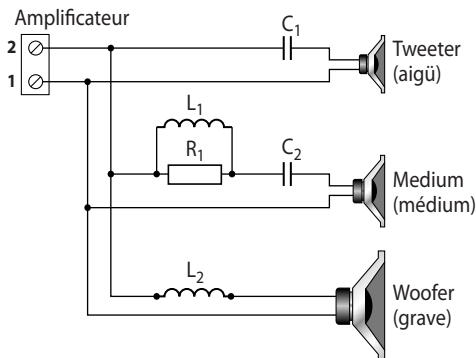
Travail à la maison	• Préparation à la première séance : Activité 1A.
Séance de TP	• Activités 1B et 2A (en demi-groupe, 1 h 30).
Travail à la maison	• Activité 2B.
Séance de TP	• Activités 3 et 4 (en demi-groupe, 1 h 30).

E. Réponses aux exercices p. 90-91

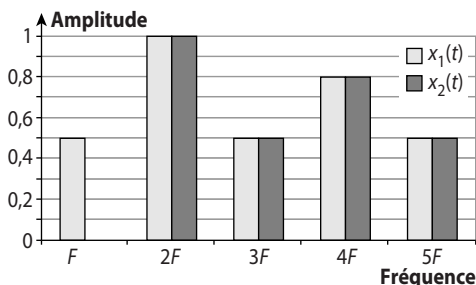
Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 206.

6 1. Le petit haut-parleur émet les sons les plus aigus. Il est donc associé à un filtre passe-haut. Le gros haut-parleur émet les sons les plus graves. Il est donc associé à un filtre passe-bas.

2.



7 1.



2. La hauteur du premier son est égale à F .

3. Les différents modes de vibration du second signal ne sont pas des multiples entiers

du premier mode de vibration. Celui-ci n'est donc pas son mode fondamental.

En revanche, ils sont tous multiples entiers de F . La fréquence du mode fondamental du second signal est donc F , et cette valeur correspond à la hauteur du son.

4. Dans le second signal, le mode fondamental, à basse fréquence, a été éliminé. On l'obtient donc à partir du premier signal à l'aide d'un filtre passe-haut dont la fréquence de coupure est comprise entre F et $2F$.

8 1. Un filtre passe-bande ne laisse passer qu'une bande de fréquence du signal émis par un oscillateur.

2. Un filtre à réjection de bande élimine une bande de fréquence du signal émis par un oscillateur.

3. On obtient un filtre passe-bande en associant un filtre passe-bas et un filtre passe-haut en série, tels que la fréquence de coupure du filtre passe-bas soit supérieure à la fréquence de coupure du filtre passe-haut. Les signaux de fréquence supérieure à la fréquence de coupure du filtre passe-bas sont atténués par le filtre passe-bas, alors que les signaux de fréquence inférieure à la fréquence de coupure du filtre passe-haut sont atténués par le filtre passe-haut.

On obtient un filtre à réjection de bande en associant un filtre passe-bas et un filtre passe-haut en parallèle, tels que la fréquence de

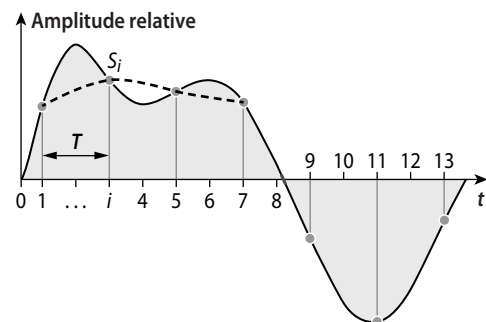
coupure du filtre passe-bas soit inférieure à la fréquence de coupure du filtre passe-haut. Les signaux de fréquence inférieure à la fréquence de coupure du filtre passe-bas traversent ce filtre, de même que les signaux de fréquence supérieure à la fréquence de coupure du filtre passe-haut.

9 1. Sur cette enveloppe, on identifie quatre parties : l'attaque, la chute, le maintien et l'extinction.

2. Voir doc. 8 p. 87 du manuel. La touche est enfoncée pendant toute la phase d'attaque, relâchée pendant les trois autres phases.

10 1. Le graphe à tracer est identique à celui tracé sur le manuel, sans la courbe, avec uniquement les points.

2.



Le signal obtenu est différent du signal de départ. La qualité de la numérisation d'un signal dépend donc de la fréquence d'échantillonnage.

11 1. Le timbre d'un instrument correspond aux modes de vibration constituant un son émis par cet instrument et par leur amplitude relative.

2. Le positionnement du majeur de la main gauche étouffe le mode fondamental de la note jouée.

3. Le mode fondamental est la vibration de plus basse fréquence associée à la note jouée. Un filtre passe-haut permettrait donc de l'étouffer.

12 1.
$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 225 \text{ Hz.}$$

2. Le dipôle D sert à entretenir les oscillations électriques.

3. La résistance interne r de la bobine est à l'origine d'une atténuation des oscillations, compensée par le dipôle D.

F. Réponses aux sujets BAC p. 92-93

13 1. Les premiers objectifs d'un instrument électroacoustique étaient de reproduire les sons d'un orgue à tuyaux.

2. Une roue phonique génère un signal électrique périodique, tout comme une corde de guitare crée une vibration périodique.

3. La fréquence du signal créé par la roue phonique dépend du nombre de dents de la roue, ainsi que de sa vitesse de rotation.

4. Une roue phonique est à l'origine d'un signal électrique d'une fréquence donnée. Pour former un son complexe, il faut plusieurs modes de vibration, donc plusieurs roues phoniques.

5. On parle de « synthèse additive » car la formation d'un son complexe se fait par addition des signaux périodiques produits par chacune des roues phoniques.

6. Pour produire ce signal, il faut trois roues dentées (une pour le mode fondamental et une pour chaque mode harmonique). La roue formant le mode fondamental doit posséder 9 dents ($9 \times 50 = 450$; ainsi, l'objet métallique est « vu » 450 fois par seconde, valeur la plus proche de $F_1 = 440 \text{ Hz}$). La roue formant l'harmonique de rang 3 doit posséder 26 dents ($26 \times 50 = 1300$, valeur la plus proche de $F_3 = 1320 \text{ Hz}$) et la roue formant l'harmonique

de rang 5 doit posséder 45 dents ($45 \times 50 = 2\,250$, valeur la plus proche de $F_5 = 2\,200$ Hz).

14 1. La sourdine rend un son plus doux et modifie la « voix » de l'instrument.

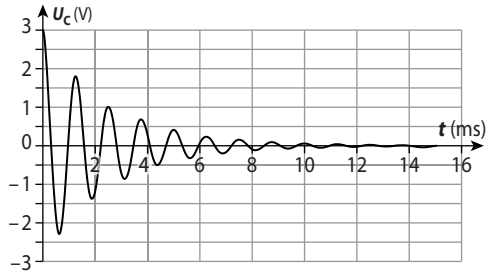
2. Les graphes du document 3 présentent les modes de vibration constituant le son émis par la trompette, sans sourdine et avec sourdine.

3. La sourdine ne modifie pas la hauteur du son émis, mais son timbre, en éliminant les harmoniques de haute fréquence.

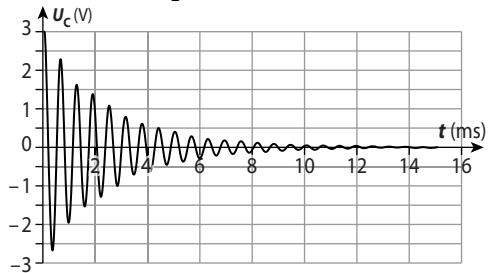
4. La sourdine utilisée ici pourrait être remplacée par un filtre passe-bas.

G. Épreuve expérimentale p. 94

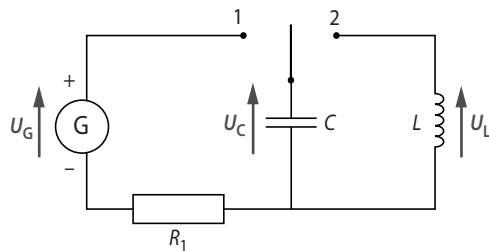
1.1. Condensateur C_1 :



Condensateur C_2 :



1.2.



2. On peut proposer aux élèves de se servir de trois couleurs de fils. Le noir, par exemple, sert au circuit de charge du condensateur, le rouge au circuit de décharge dans la bobine et le vert à la connexion à l'interface d'acquisition.

3. et 4. Lorsque c'est possible, une acquisition à déclenchement programmé peut être faite par les élèves : régler l'interface d'acquisition pour qu'elle ne débute que lorsque la tension entre les bornes du condensateur devient inférieure à une valeur choisie précédemment. On peut ainsi lancer le processus d'acquisition avant de basculer l'interrupteur, au lieu de devoir tout faire en même temps.

5.1. Lorsque la capacité du condensateur diminue, la pseudo-période des oscillations diminue également ($T_1 = 1,26$ ms et $T_2 = 0,63$ ms).

5.2. On rappelle la valeur théorique de la période $T_0 = 2\pi\sqrt{LC}$.

Les différences constatées s'expliquent par le fait que si la capacité du condensateur est faible, la durée de charge et de décharge est courte, d'où une période d'oscillations faible.

H. Science et société p. 95

Technologie. La révolution du numérique

1. Numériser un son consiste à mesurer son amplitude à intervalles de temps réguliers et

suffisamment petits pour obtenir une succession de valeurs qui reproduisent l'évolution de l'amplitude du son au cours du temps.

2. Un signal numérique ne comprend que des échantillons du signal analogique numérisé. Il occupe donc un espace de stockage plus petit. Par ailleurs, il est plus facile de modifier ce signal, notamment pour diminuer le bruit.

Histoire. Le Thereminvox

1. Un Thereminvox est commandé par les mouvements des mains du musicien. La fréquence et l'intensité du son émis dépendent de la distance des mains à deux antennes, l'une droite et verticale, l'autre en forme de boucle et horizontale.

2. Les antennes du Thereminvox sont des oscillateurs délivrant des champs électromagnétiques à haute fréquence, trop élevée pour être audible. L'un de ces champs est constant et l'autre est variable. L'interférence entre ces deux champs produit un son perceptible, qui est modulé en modifiant localement les champs avec le positionnement des mains.

3. Le premier instrument électronique connu est le thelharmonium. Cet instrument résulte des travaux de l'inventeur canadien Thaddeus Cahill, en 1897. Très encombrant, il n'a toutefois pas connu le succès.

I. Bibliographie

- ✓ A. Schuhl et J.-L. Schwartz, *La Musique est-elle une science ?*, Le Pommier, 2005.
- ✓ « Le monde des sons », *Pour la Science*, dossier n° 32, 2001.

Chapitre 7

LES ÉMETTEURS ET RÉCEPTEURS SONORES

A. Le programme

Thème 2 : Son et musique

Domaine d'étude	Mots-clés
Émetteurs et récepteurs sonores	• Enceintes acoustiques • Microphone

✓ **Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties**

- Associer un modèle à un phénomène physique.
- Identifier les éléments d'une chaîne de transmission d'informations.

B. La démarche adoptée dans le manuel

L'étude des émetteurs et récepteurs sonores nécessite de maîtriser la notion de champ magnétique rencontrée en 1^{re} S. Les effets du champ magnétique (force de Laplace et induction) sont abordés dans ce chapitre.

Les filtres électriques, partie importante des enceintes acoustiques, sont évoqués, sans calculs de fonctions de transfert. Seul leur effet sur la fréquence est étudié.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► **Vérifier ses acquis** p. 96

✓ **Réponses aux questions**

- Les grains de limaille de fer s'aimantent en présence du champ magnétique créé par l'aimant en U. Soumis à l'action du champ magnétique, les grains de limaille s'orientent dans la direction du champ, puis en s'attirant les uns les autres, ils forment des chaînes plus ou moins régulières. Ces chaînes représentent approximativement les lignes du champ magnétique.
 - Le champ magnétique est orienté du pôle nord de l'aimant vers son pôle sud. Il est donc possible de le représenter (ou modéliser) à l'aide d'un vecteur mathématique dont la direction et le sens sont celui du champ magnétique.
- L'unité de champ magnétique est le tesla, de symbole T (du nom du physicien d'origine serbe Nikola Tesla).

► S'interroger p. 96

Les haut-parleurs possèdent une bande passante. Afin de couvrir tout le spectre des fréquences audibles par l'oreille humaine, une enceinte doit posséder au moins deux haut-parleurs, l'un dont la bande passante est dans les sons graves, l'autre dans les sons aigus.

► Activité 1 p. 98

Cette activité est conçue en deux temps : une partie expérimentale au cours de laquelle le gain du haut-parleur est mesuré ; une partie exploitation au cours de laquelle on trace sur papier semi-logarithmique la courbe de gain afin de déterminer la bande passante du haut-parleur. Cette partie nécessite l'utilisation d'une feuille semi-logarithmique dont le principe est expliqué dans la fiche p. 197 du manuel.

✓ Réponses aux questions

1. Exemples du boomer et du médium dont les diagrammes de Bode sont représentés p. 98 du manuel.

Boomer

F (Hz)	10	30	100	300	1 000	3 000	5 000	8 000
G (dB)	0,0	0,0	0,0	- 0,2	- 1,0	- 10,0	- 24,0	- 40,0
A	1,000	1,000	1,000	0,098	0,891	0,316	0,063	0,010

Médium

F (Hz)	10	30	100	300	1 000	3 000	5 000	7 000
G (dB)	- 40,0	- 13,0	- 2,0	- 0,1	- 4,0	- 21,0	- 32,0	- 35,0
A	0,01	1,00	1,00	0,098	0,891	0,316	0,063	0,010

2. Voir doc. 2 p. 98 du manuel.

3. Boomer : $F_{(-3\text{dB})} = 2 \text{ kHz}$.

Médium : $F_{B(-3\text{dB})} = 70 \text{ Hz}$; $F_{H(-3\text{dB})} = 800 \text{ Hz}$.

4. Le boomer (**a**) est le haut-parleur basses fréquences, le médium (**b**) est le haut-parleur moyennes fréquences et le tweeter (**c**) est le haut-parleur hautes fréquences.

5. Boomer : [20 Hz ; 2 kHz]. Médium : [70 Hz ; 800 Hz]. Tweeter : [130 Hz ; > 10 kHz].

6. **a.** Plus le diamètre du haut-parleur est grand, plus les fréquences encadrant sa bande passante sont faibles.

b. Plus le diamètre du haut-parleur est grand, plus la longueur d'onde des sons qu'il peut produire est grande. C'est pour cela que les haut-parleurs de diamètre élevé sont plus performants dans les basses fréquences, pour les sons graves $\left(\lambda = \frac{c}{F}\right)$.

► Activité 2 p. 99

La première partie de cette activité consiste à présenter la structure d'un haut-parleur et à mettre en évidence le son arrière produit par celui-ci. Cette activité peut faire l'objet d'une séance de travaux pratiques.

En s'appuyant sur ce dernier point, on explique ensuite l'intérêt de l'enceinte acoustique. On peut insérer un haut-parleur dans une boîte en carton dans laquelle on dispose des matériaux absorbants le son, puis on note l'amélioration du son avant émis par le haut-parleur.

✓ Réponses aux questions

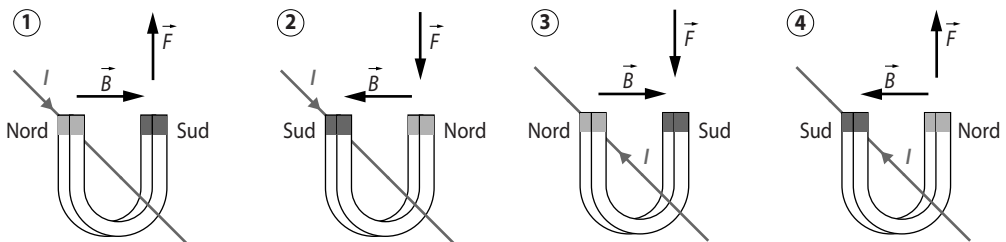
1. Selon le matériel disponible en salle de TP.
2. Les suspensions permettent à la membrane de suivre les mouvements de la bobine. Le saladier est ajouré afin que l'air puisse circuler à l'arrière du haut-parleur sans modifier le mouvement de la membrane.
3. Le son avant et le son arrière sont en opposition de phase : en effet, si la membrane recule, la pression de l'air baisse à l'avant et augmente à l'arrière.
4. Avec ces dispositifs, on cherche à supprimer le son arrière qui peut créer localement des interférences avec le son avant.
5. L'évent (en anglais : *bass reflex*) prolonge la bande passante vers les basses fréquences.
6. La fréquence vaut 50 Hz. Pour cette fréquence, l'évent entre en résonance (comme un tuyau sonore) et provoque un déphasage supplémentaire de 180° . Le son arrière revient donc en phase avec le son avant.
7. Le but de cette question est de faire remarquer que l'évent permet de diminuer la taille des haut-parleurs, et donc des enceintes acoustiques, pour des performances comparables dans les basses fréquences.

► Activité 3 p. 100

Le but de cette activité expérimentale est de comprendre comment un signal électrique est transformé en vibration mécanique de la bobine et, par suite, de la membrane du haut-parleur. La balance de Cotton sert à mettre en évidence la force de Laplace qui s'exerce sur un conducteur électrique placé dans un champ magnétique et à déterminer son expression.

Réponse aux questions

1. Les sens du courant électrique et celui du champ magnétique doivent créer une force de Laplace vers le bas. Il y a donc deux sens possibles pour ces deux grandeurs (2^e et 3^e schémas ci-dessous).



2. C'est la plus petite valeur des poids qui permet un déplacement du fléau de la balance de Cotton.

NB : on pourra faire l'expérience du rail de Laplace si on ne dispose pas d'une balance de Cotton.

3. a. Expérience à faire.

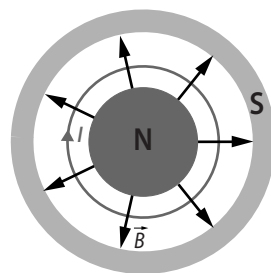
b. Pour les faibles valeurs de l'intensité, les mesures sont peu fiables compte tenu des faibles valeurs de la force de Laplace par rapport à celles des forces de frottement. Un coefficient obtenu expérimentalement correspond à une force $F = 5 \cdot 10^{-4}I$, ce qui correspond à une masse de 500 mg pour équilibrer la balance parcourue par un courant d'intensité $I = 10$ A.

4. L'aimant est dit radial car les lignes de champ sont les rayons de cet aimant circulaire. Le pôle nord est au centre comme l'indique la boussole à droite de la photo.

5. La force de Laplace est perpendiculaire à la feuille, dirigée vers le haut.

6. Supposons que la tension aux bornes de la bobine du haut-parleur est sinusoïdale de fréquence f . Le courant électrique d'intensité $i(t)$ qui circule dans la bobine est sinusoïdal et possède la même fréquence (il peut être déphasé par rapport à la tension).

La force de Laplace est proportionnelle à l'intensité du courant et change de sens lorsque le courant change de sens. La bobine, sous l'effet de la force de Laplace, oscille et entraîne la membrane dont le mouvement est sinusoïdal de fréquence f . Cela crée une onde sonore de fréquence f . La fréquence est commune à toutes ces grandeurs (mais il peut y avoir des déphasages entre elles). Si la tension électrique est trop élevée, il peut se produire des saturations ou des non linéarités, et le son de l'enceinte acoustique est alors déformé.



► Activité 4 p. 101

L'objectif de cette activité est de comprendre le fonctionnement d'un microphone. Dans la partie A, le phénomène d'induction électromagnétique est illustré à l'aide d'une expérience, puis son exploitation au sein du microphone est mise en évidence.

Dans la partie B, on utilise un microphone de petite taille couplé à un oscilloscope pour mesurer la longueur d'onde d'un son émis par un haut-parleur dans un tube de Kundt.

✓ Réponses aux questions

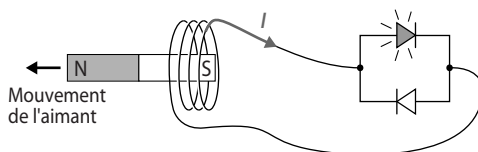
1. Figure ci-contre.

2. La membrane vibre sous l'effet de l'onde sonore. La bobine qui lui est reliée se déplace et son mouvement par rapport à l'aimant, comme dans l'expérience précédente, induit une tension $U(t)$ alternative, de même fréquence que l'onde sonore.

3. La distance entre deux nœuds ou entre deux ventres consécutifs est égale à une demi-longueur d'onde, soit 24,3 cm.

4. λ vaut environ 49 cm.

5. $\lambda_{\text{théorique}} = \frac{c}{F} = \frac{340}{700} = 48,6 \text{ cm.}$



D. Déroulement du cours

On peut compter pour ce chapitre deux séances d'activités expérimentales en demi-groupe et deux séances en classe entière.

Séance de TP • En demi-groupe : activités 1 et 2 (1 h 30 à 2 h).

En classe entière • Bande passante ; description d'une enceinte ; exercices d'application (1 h 30).

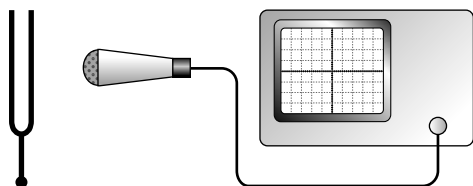
Séance de TP • En demi-groupe : activités 3 et 4 (1 h 30 à 2 h).

En classe entière • Force de Laplace ; induction électromagnétique ; exercices d'application (1 h 30).

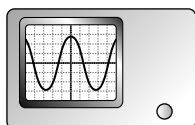
E. Réponses aux exercices p. 76-77

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 206.

5 1.



2.



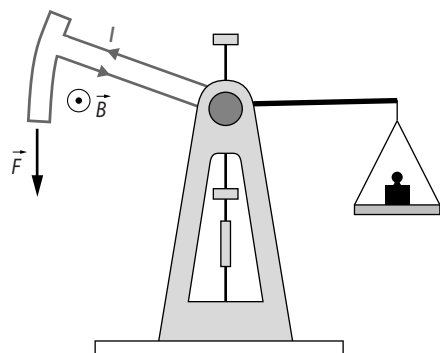
3. Si le diapason émet une fréquence de 440 Hz, la période vaut 2,27 ms et on visualise un peu moins de deux périodes sur l'écran de l'oscilloscope qui balaye l'écran sur une durée de 4 ms.

6 1. Le champ magnétique participe à la force de Laplace qui s'exerce sur la bobine du haut-parleur.

2. Dans le microphone à induction, le champ magnétique participe à l'induction d'une tension électrique.

3. Voir réponse à l'activité 3, question 5.

7 1.



2. Les conducteurs quasi-verticaux sont aussi soumis à la force de Laplace, mais ils sont traversés par des courants de sens opposés

et les forces de Laplace sur ces conducteurs s'annulent.

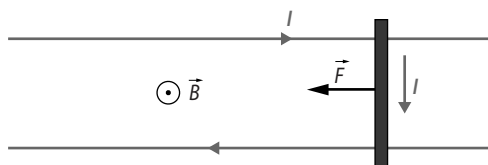
3. Pour une intensité du courant donnée, la force de Laplace mesurée est proportionnelle au champ magnétique B .

$$4. B = \frac{F}{IL} = \frac{mg}{IL},$$

donc $B = 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ (avec $g = 9,8 \text{ N} \cdot \text{kg}^{-1}$).

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta m}{m} = 0,1. \text{ D'où } B = 0,098 \pm 0,01 \text{ T.}$$

8 1.



$$2. F = BIL = 10 \text{ N.}$$

$$3. E_c = \frac{1}{2}mv_1^2 = 1 \text{ 000 J.}$$

9 1. Pente de l'asymptote BF = 44 dB par décade ; pente de l'asymptote HF = -34 dB par décade.

$$2. F_{B(-3\text{dB})} = 90 \text{ Hz} ; F_{H(-3\text{dB})} = 2 \text{ kHz.}$$

3. On place un événement et on modifie en conséquence le filtre électrique pour laisser passer les basses fréquences.

10 1. a. $P_{\text{oreille}} = IS_{\text{oreille}}$, avec I en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ et S_{oreille} en m^2 . Soit $P_{\text{oreille}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \times 2 \cdot 10^{-4} = 220 \text{ nW}$.

$$b. \frac{P_{\text{oreille}}}{P_{\text{fournie}}} = \frac{P_{\text{oreille}}}{P_{\text{électrique}}} = \frac{220 \cdot 10^{-9}}{100} = 2,2 \cdot 10^{-9}.$$

2. $P_{\text{rayonnée}} = IS'$, S' étant la surface de $3/4$ de sphère, soit :

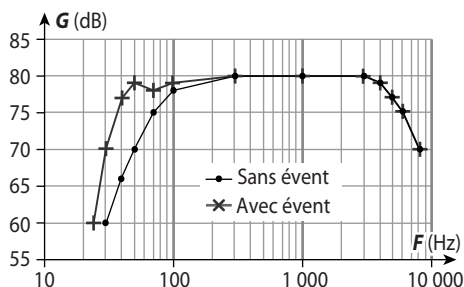
$$P_{\text{rayonnée}} = 1,1 \cdot 10^{-3} \times 4\pi \times 1 \times 3/4 = 10,4 \text{ mW.}$$

$$3. \rho = \frac{P_{\text{rayonnée}}}{P_{\text{électrique}}} = \frac{10,4 \cdot 10^{-3}}{100} = 1,04 \cdot 10^{-4}.$$

Le son émis représente un dix-millième de la puissance consommée par l'enceinte.

4. La perte de puissance est due essentiellement à la perte par effet Joule dans la résistance de la bobine, mais aussi aux frottements et aux déformations des suspensions de la membrane.

11 1. Voir figure ci-contre.



2. L'événement augmente la bande passante dans les basses fréquences.

F. Réponses aux sujets BAC p. 106-107

12 1. On effectue plusieurs séries de mesures car il existe une dispersion des mesures.

2. **Erratum** : il faut lire : « Calculer la célérité moyenne du son entre les fréquences F_2 et F_1 ; F_3 et F_2 ; F_4 et F_3 ; F_5 et F_4 ; F_6 et F_5 . » À 1 kHz, la longueur d'onde vaut 34 cm ; à 2 kHz elle vaut 17 cm. Il est donc possible d'observer plusieurs nœuds de vibration dans le tuyau sonore.

3. On utilise la formule donnée dans le document 2, avec $L = 1,02$ m.

Entre les fréquences	F_2 et F_1	F_3 et F_2	F_4 et F_3	F_5 et F_4	F_6 et F_5
c ($m \cdot s^{-1}$)	344,8	340,7	344,8	342,7	346,8

4. La moyenne vaut $343,9 m \cdot s^{-1}$ et l'écart type (racine carrée de la moyenne des carrés des écarts par rapport à la moyenne) vaut 2,08. Notons que l'écart moyen (moyenne des valeurs absolues des écarts par rapport à la moyenne) vaut 1,8.

On peut alors écrire : $c = 343,9 \pm 2,1 m \cdot s^{-1}$.

5. Pour une température de 297 K, $c = 345,5 m \cdot s^{-1}$.

Compte tenu de l'incertitude proche de $2 m \cdot s^{-1}$, les valeurs mesurées ne font pas apparaître de différence notable entre la vitesse du son dans l'air et celle du son dans un gaz parfait monoatomique.

6. Le document 4 montre clairement que lorsqu'on est loin de la source sonore, les

hautes fréquences sont plus fortement atténuées que les basses fréquences. À 1 km du concert, l'atténuation est :

– 2 dB pour 70 Hz ; – 2,5 dB pour 200 Hz ;
– 5 dB pour 3 kHz ; – 20 dB pour 8 kHz.

13 **Précision** : le micro est positionné au centre du diagramme. Sur le diagramme, il faut lire « Direction du micro ».

1. L'effet Larsen entraîne une amplification progressive et auto-entretenue du son capté par le microphone, et donc du son produit par le haut-parleur et qui revient sur le microphone. Cela augmente l'amplitude des vibrations de la membrane du haut-parleur au-delà des valeurs prévues par le constructeur. La membrane peut donc finir par se déchirer si l'amplitude des vibrations devient trop importante.

2. a. Le microphone est à 4 m de l'enceinte. Le niveau du son est de 85 dB à 1 m du micro, donc à 3 m de l'enceinte.

Le niveau sonore revenant sur le micro vaut (formule du document 2) :

$$L_2 = L_1 + 20 \log \left(\frac{d_1}{d_2} \right), \text{ avec } L_1 = 85 \text{ dB}, d_1 = 3 \text{ m et } d_2 = 4 \text{ m.}$$

$$\text{Soit } L_2 = 85 + 20 \log \left(\frac{3}{4} \right) = 82,5 \text{ dB.}$$

Il y a donc effet Larsen, car le niveau sonore provenant de l'enceinte (82,5 dB) est supérieur à celui fourni par le chanteur

(70 dB). L'amplification dans la boucle vaut 12,5 dB.

b. D'après le document 1, la direction du son provenant de l'enceinte est à 90° par rapport à la direction du micro.

D'après le diagramme (document 3), ce son est capté par le micro avec une atténuation de 5 dB. Le son capté par le micro est donc de $82,5 - 5 = 77,5$ dB, ce qui reste supérieur à 70 dB : le risque d'effet Larsen n'est donc pas évité.

Pour que l'effet Larsen soit évité, l'enceinte devrait être placée avec un angle compris entre environ 135° et 225° par rapport au micro pour que l'atténuation soit supérieure ou égale à 12,5 dB.

3. L'effet Larsen peut endommager les membranes des enceintes, mais c'est également

un supplice pour les oreilles. Pour épargner le matériel et les spectateurs, quelques dispositions simples limitent le risque d'effet Larsen.

- Utiliser de préférence des microphones directionnels, afin qu'ils ne captent que le son produit par les chanteurs et les instruments, et pas leur propre son déjà amplifié par les enceintes.

- Agir à la console, en identifiant la fréquence à laquelle se produit le Larsen et en l'atténuant rapidement.

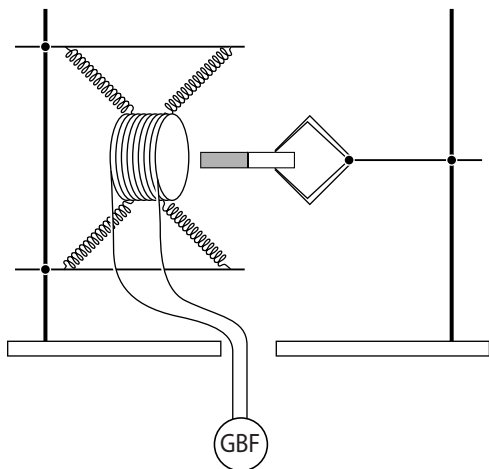
- Utiliser des enceintes directives et jouer sur leur orientation pour éviter qu'elles émettent des sons vers les microphones.

- Si un effet Larsen se produit quand même, le chanteur ou le musicien peuvent le stopper en déplaçant légèrement le micro par rapport aux enceintes, évitant ainsi que des signaux arrivent en phase au micro.

G. Épreuve expérimentale p. 108

1.1. La membrane, solidaire d'une bobine, crée l'onde sonore en se déplaçant dans l'air.

2.1.



2.2. Pour les fréquences inférieures à 20 Hz, on observe une vibration de la bobine (mouvement d'avant en arrière).

2.3. Si la fréquence augmente, on entend un son. À partir d'une certaine fréquence, l'inertie de la bobine ne permet plus de suivre le

mouvement imposé par le couplage électromécanique.

Le phénomène semble s'arrêter.

2.4. et 2.5. Aux fréquences élevées le son n'est plus perceptible. On montre ainsi la notion de fréquence de coupure.

Ces fréquences dépendent du niveau sonore émis.

3.1. La bande des fréquences audibles peut changer. Avec une bobine de plus grand nombre de spires, le mouvement est plus ample.

La loi de Faraday explique ce phénomène : la fem induite est proportionnelle à la variation du flux, lui-même proportionnel au nombre de spires.

3.2. et 3.3. On peut faire bouger la bobine ou parler devant elle.

3.3. Si on observe un signal sur l'oscilloscope lorsqu'on parle devant la bobine, on a réalisé un microphone.

Dans ce cas, le phénomène physique mis en évidence est l'induction électromagnétique d'une tension électrique.

Métier. Ingénieur du son

Un ingénieur du son pratique, entre autres, le mixage. Cela consiste à mélanger plusieurs bandes de signaux sonores afin d'obtenir l'effet voulu. Par exemple, le mixage est nécessaire pour adapter la bande sonore à un film.

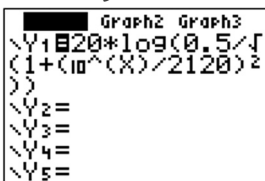
Culture. Fête de la musique

La fête de la musique a eu lieu pour la première fois le 21 juin 1982. Elle a été rendue très populaire grâce au développement des enceintes acoustiques et des microphones. Cela a permis la fabrication de matériels portables, pas trop fragiles et à des prix compétitifs. Ainsi, la musique a pu descendre dans la rue et être entendue par tous.

I. Compléments pédagogiques

L'énoncé est disponible sur www.libtheque.fr/physiquechimie.lycee

► Corrigé

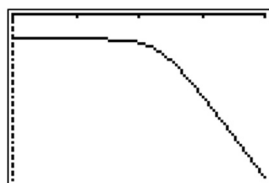
1. 

Equation

X	Y1
0	-6.021
1	-6.021
2	-6.03
3	-6.893
4	-19.68
5	-39.5
6	-59.49

X=0

Table



Graphique

Gain basses fréquences : -6,02 dB.

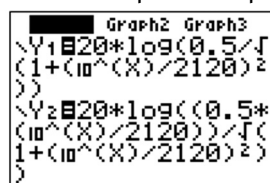
Pente entre X = 4 et X = 5 : -20 dB/décade.

X_c pour $G = G_{\max} - 3$ dB (sans réduire les échelles) : entre 3,3 et 3,359, ce qui donne $2,0 \text{ kHz} < F_c < 2,3 \text{ kHz}$.

X_c en réduisant les échelles (X de 3 à 3,5 ; Y de -10 à -8) : 3,269.

Soit $F_c = 10^{3,269} = 2,12 \text{ kHz}$ pour $G = -9,03 \text{ dB}$.

2. C'est une échelle logarithmique, où la fréquence F est représentée par $\log(F)$.

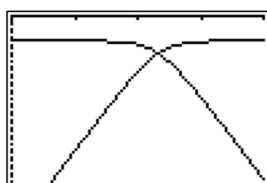
3. 

Equation

X	Y1	Y2
0	-6.021	-72.55
1	-6.021	-52.55
2	-6.03	-32.56
3	-6.893	-13.42
4	-19.68	-6.212
5	-39.5	-6.023
6	-59.49	-6.021

X=0

Table



Graphique

4. $X_r = 3,269$, ce qui donne : $F_r = 2,12 \text{ kHz}$.

5. Pour le tweeter, on réduit la bande passante de 1 kHz à 2 kHz environ, soit d'une octave. Pour le boomer, on la réduit de 4 kHz à 2 kHz, soit encore d'une octave : la réponse est oui.

Remarque : pour relever la pente d'une asymptote lorsque l'on ne dispose pas d'une décade, on applique la formule :

$$\text{Pente} = \frac{G_2 - G_1}{\log(F_2) - \log(F_1)} = \frac{G_2 - G_1}{X_2 - X_1}$$

I. Bibliographie

- ✓ « Le monde des sons », *Pour la Science*, dossier n° 32, 2001.
- ✓ P. Loyez, *Techniques des haut-parleurs et des enceintes acoustiques*, 2^e édition, Dunod, 2003.
- ✓ R. Lehman, *Les transducteurs électro et mécano-acoustiques. Haut-parleurs et microphones*, Chiron, 1963.

Chapitre 8

SON ET ARCHITECTURE

A. Le programme

Thème 2 : Son et musique

Domaines d'études	Mots-clés
Émetteurs et récepteurs sonores	Voix • Acoustique physiologique
Son et architecture	• Auditorium • Salle sourde • Isolation phonique • Acoustique active • Réverbération

✓ **Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties**

- Extraire et exploiter des informations sur les manifestations des ondes mécaniques dans la matière.
- Connaître et exploiter la relation liant le niveau d'intensité sonore à l'intensité sonore.
- Extraire et exploiter des informations sur :
 - des sources d'ondes ;
 - un dispositif de détection.
- Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection.
- Connaître et exploiter la relation entre la période ou la fréquence, la longueur d'onde et la célérité d'une onde progressive.
- Réaliser l'analyse spectrale d'un son et l'exploiter.
- Exploiter des informations pour comparer les différents types de transmissions.

✓ **Commentaires**

« Son et architecture » est une partie nouvelle du programme de spécialité physique-chimie en classe de TermSM S. Ce sujet est en relation avec la prise de conscience des enjeux sanitaires des nuisances sonores et des règles de prévention, prises notamment sous l'impulsion de l'Union européenne. La notion de fréquence des sons est très présente dans ce chapitre et les 3 décades ou 10 octaves des sons audibles donnent du fil à retordre aux architectes.

B. La démarche adoptée dans le manuel

Nous avons placé l'acoustique physiologique dans ce chapitre 8 « Son et architecture » afin de placer l'Homme au cœur des questions abordées ici.

La production de la voix est rapidement évoquée, car le rôle des cordes vocales est très complexe et une étude correcte nécessite des outils anatomiques. La voix est donc abordée dans une étude documentaire sur la reconnaissance vocale (Activité 2).

Les exercices portent essentiellement sur la prévention des nuisances sonores. Signalons à cet effet que les seuils de douleur (très subjectifs) présentés dans l'Activité 1 sont issus du dossier n° 32 « Le monde des sons », *Pour la Science*, 2001.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p. 110

✓ Réponses aux questions

- Une onde sonore est la propagation d'une vibration de surpression ΔP (Pa) dans un milieu matériel comme l'air ou l'eau. Dans l'air, la vitesse de propagation c du son est voisine de $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Les fréquences associées vont de quelques hertz à plusieurs dizaines de kilohertz.
- L'unité de la surpression ΔP est le pascal (Pa).
- La longueur d'onde λ (m) s'exprime par : $\lambda = \frac{c}{F}$, avec c en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ et F en Hz.

► S'interroger p. 110

Une chambre sourde, ou anéchoïque, sert à mesurer les bruits émis par un appareil. Les appareils commercialisés sont des « sources » de bruit et doivent parfois respecter des normes pour leur mise sur le marché. C'est le cas des automobiles, qui sont également testées comme « victimes » de bruits : le bruit extérieur doit être diminué mais ne doit pas être totalement éliminé.

D'autres produits, comme les lave-vaisselle, doivent simplement afficher le niveau de bruit émis certifié dans une chambre sourde.

► Question d'introduction p. 111

Dans le cas des aéroports la protection comporte deux aspects :

- l'action sur les « sources » : horaires réglementés des avions, silencieux sur les réacteurs, moteurs électriques pour les déplacements au sol, etc.
- l'action sur les « victimes » : interdiction de constructions dans les zones les plus exposées, isolation des logements proches, casques de protection pour le personnel de l'aéroport, etc.

► Activité 1 p. 112

Cette activité s'appuie sur deux documents : une planche anatomique de l'oreille humaine et une description de la perception humaine moyenne et générale des sons selon leur fréquence. L'articulation entre l'ouïe et le niveau sonore et le lien entre les trois grandeurs physiques décrivant l'intensité d'un son est présenté sous forme de tableau.

✓ Réponses aux questions

1. a. Une tondeuse à gazon, un chien qui aboie...

b. On utilise les formules et les valeurs de I_0 et ΔP_0 données dans l'encadré « S'informer » :

$$L = 10 \log \left(\frac{2 \cdot 10^{-5}}{10^{-12}} \right) = 73,0 \text{ dB} ; \Delta P = 2 \cdot 10^{-5} \times 10^{73/20} = 8,93 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}.$$

2. La fréquence minimale est 20 Hz. La fréquence maximale dépend des individus et vaut au plus 20 kHz.

3. Aux limites du spectre audible, le seuil de douleur se confond avec le seuil de perception. À très hautes fréquences (juste en dessous de 20 kHz), on peut ressentir une douleur à partir de 75 dB (seuil de douleur le plus bas) et à très basses fréquences (juste au-dessus de 20 Hz) à partir de 90 dB environ. Le seuil de douleur le plus élevé se situe autour de 500 Hz et vaut environ 120 dB.

4. Pour le seuil de 75 dB à 20 kHz : $I = 10^{-12} \times 10^{75/10} = 3,16 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Pour le seuil de 90 dB à 20 Hz : $I = 10^{-12} \times 10^{90/10} = 10^{-3} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Pour le seuil de 120 dB à 500 Hz : $I = 10^{-12} \times 10^{120/10} = 1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

5. Le cerveau identifie la fréquence d'un son par « comptage » du nombre de récepteurs excités par la vibration de la cochlée : plus le son est grave, plus ce nombre est important. Le fondamental, qui est l'harmonique la plus grave, « couvre » donc les harmoniques de fréquence plus élevée. Seuls les musiciens, à l'oreille entraînée, sont capables de déceler la variation d'intensité correspondant à l'excitation des premiers récepteurs sensoriels et entendent les timbres différents de chaque instrument.

NB : il ne faut pas confondre le timbre d'un instrument et l'« attaque », qui est une succession plus ou moins fréquente de régimes transitoires permettant facilement, même pour un non musicien, de distinguer un piano d'une guitare, par exemple. Mais si l'on supprime l'attaque de ces deux instruments et que l'on écoute une note prolongée, il devient difficile de distinguer les deux instruments.

6. Les fréquences de la voix sont comprises entre 300 Hz et 8 kHz. Le téléphone fait donc l'économie des fréquences inférieures à 300 Hz. Il supprime les fréquences aiguës de la voix, soit une octave sur cinq environ pour la voix. Le téléphone transmet un peu moins de quatre octaves.

NB : Le choix de 3,4 kHz est lié à la fréquence d'échantillonnage du son téléphonique qui vaut 8 kHz. Le physicien américain Claude Shannon a montré que la fréquence d'échantillonnage devait être supérieure à deux fois la fréquence maximale du son à échantillonner. Pour « passer » des fréquences sonores supérieures à 4 kHz, il aurait fallu augmenter la fréquence d'échantillonnage et donc le nombre des échantillons, ce qui pourrait avoir comme conséquence de diminuer la capacité du réseau en nombre de communications à transmettre.

► Activité 2 p. 113

Cette activité explique le principe de la reconnaissance vocale à l'aide de l'exploitation de deux spectrogrammes. L'un met en évidence la modification du spectrogramme selon la tonalité de la voix qui prononce un même mot (doc. 4), l'autre est obtenu pour un mot donné (doc. 5).

✓ Réponses aux questions

1. Principalement la gorge et la bouche.

2. Voir Activité 1, réponse à la question 6 ci-avant.

NB : on peut profiter de cette question pour proposer un exemple de transmission numérique et expliquer le principe de l'échantillonnage.

3. Tous les styles de chant ont un niveau sonore plus important aux basses fréquences, surtout à partir de 300 Hz. Cette fréquence correspond au début de la zone rouge foncé. Que le mot « sweet » soit parlé ou chanté, la consonne sifflante « s » conduit à un niveau sonore relativement élevé sur toute la gamme de fréquences.

4. Le son sifflant « z » se situe au moment de la liaison entre « les » et « enfants ».
5. Comme dans le cas du « s » sur le doc. 4, les sons sifflants « z » et « f » correspondent à un niveau sonore réparti sur toute la gamme de fréquences. Les voyelles correspondent à un niveau sonore plus important aux basses fréquences.
6. La consonne « l » dans « les enfants » possède un spectre plus étroit.
7. Chaque son (consonnes, voyelles...) est caractérisé par des fréquences, des niveaux sonores et des durées qui lui sont propres. Chaque mot prononcé par un locuteur pourra alors être analysé puis comparé à des mots enregistrés.
8. La reconnaissance vocale consiste à analyser les mots prononcés par un locuteur (fréquences, niveaux sonores, durées) et à les comparer à des mots enregistrés dans une base de données. Si le mot analysé n'est pas dans la base de données, le logiciel donnera en réponse le mot qui s'en rapproche le plus, ce qui constitue une source d'erreur courante. Il est donc important de paramétrer correctement le logiciel. Les applications possibles de la reconnaissance vocale sont, par exemple, les menus téléphoniques des serveurs vocaux ou la commande d'appareils par une personne handicapée.

► Activité 3 p. 114

Le but de cette activité expérimentale est de sensibiliser l'élève aux performances de différents matériaux sur l'isolation phonique et à l'influence de la fréquence de l'onde sonore incidente sur ces performances.

✓ Réponses aux questions

1. La relation entre l'atténuation A (dB) et le coefficient de transmission t s'écrit (on utilise la formule donnée dans l'activité 1 p. 112 du manuel pour l'expression de L) :

$$A = L_{\text{inc}} - L_{\text{tra}} = 10 \log \left(\frac{I_{\text{inc}}}{I_0} \right) - 10 \log \left(\frac{I_{\text{tra}}}{I_0} \right) = 10 \log \left(\frac{I_{\text{inc}}}{I_{\text{tra}}} \right) = -10 \log(t).$$

Soit : $t = 10^{-A/10}$.

Matériau	$L_{\text{tra}}(F_1)$ en dB	$A(F_1)$ en dB	$L_{\text{tra}}(F_2)$ en dB	$A(F_2)$ en dB	$L_{\text{tra}}(F_3)$ en dB	$A(F_3)$ en dB
Bois	57	13	54	16	64	6
Liège	67	3	61,5	8,5	68,5	1,5
Polystyrène	52	18	59,5	10,5	68,5	1,5
PVC	50	20	50	20	61	9

Les mesures pour le verre dépendent de l'épaisseur de la plaque de verre utilisée. Celle-ci n'est pas fournie avec l'ensemble du matériel.

Conclusion : l'atténuation dépend de la fréquence.

2. Cette question est numérotée 6 dans la 1^{re} édition du manuel. En conséquence, les numéros des questions suivantes sont décalés de 1.

Matériau	t à 500 Hz
Bois	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Liège	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Polystyrène	$8,9 \cdot 10^{-2}$
PVC	10^{-2}

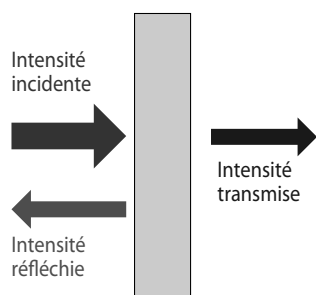
3. Comme l'atténuation dépend de la fréquence, il n'est pas possible de conclure sur le caractère isolant d'un matériau sans préciser la fréquence qu'il doit absorber. Dans la construction des bâtiments, les matériaux isolants sont donc choisis en fonction de la gamme de fréquences du bruit qu'ils doivent amortir.

4. Les autres matériaux utilisés pour l'isolation phonique sont les laines de verre ou de roche, les films ou rubans (qui évitent les poussières), les briques creuses ou pleines, le plâtre, le béton, les pâtes cuites (céramiques), la mousse de polyuréthane, le gaz argon transparent et lourd utilisé dans les doubles vitrages et qui absorbe le bruit mieux que l'air plus léger. On peut également citer les tissus et rideaux, capitonnés ou non, les joints de caoutchouc ou de silicone.

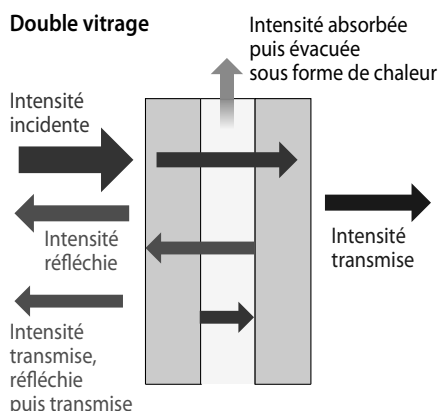
NB : depuis quelques années, on utilise des isolants minces constitués d'un feuilleté de matériaux divers (laine, silicone, aluminium, etc.), mais dont la fabrication demande parfois des quantités importantes de solvants qui peuvent poser à terme quelques problèmes d'environnement. Citons aussi l'amiante en flochage de fibre, aujourd'hui interdit, mais utilisé massivement en France pendant quarante ans.

Dans l'air du temps, les pailles compressées, le chaume et le coton de cellulose se développent.

5. Simple vitrage



Double vitrage



Le verre absorbe très peu les sons.

6. $A = L_{\text{inc}} - L_{\text{tra}} = -10 \log(t)$, donc $L_{\text{tra}} = L_{\text{inc}} + 10 \log(t)$.

Donc, pour le simple vitrage, $A_s = 80 + 10 \log(1,6 \cdot 10^{-3}) = 52$ dB, et pour le double vitrage, $A_d = 80 + 10 \log(1,6 \cdot 10^{-4}) = 42$ dB, soit une différence de 10 dB.

7. et 8. Les parois de la salle sourde absorbent les ondes sonores de longueur d'onde inférieures à 3 m, soit pour des fréquences supérieures à 100 Hz environ $\left(F = \frac{c}{\lambda}\right)$. Les intensités sonores réfléchies et transmises sont supprimées. L'énergie sonore est transformée en énergie thermique dans la paroi en mousse.

► Activité 4. p. 115

Cette activité met en évidence l'utilisation de l'acoustique active dans les salles de concert, d'une part, et dans les casques audio, d'autre part.

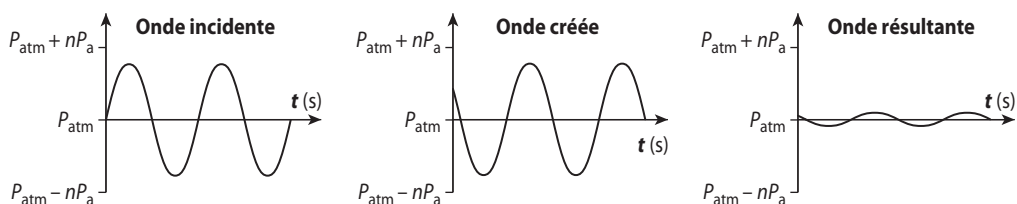
✓ Réponses aux questions

1. 1 : réflexion du plafond ; 2 : réflexion de la scène ; 3 : son direct ; 4 : écho.

2. Tissus lourds, velours, moquette.

3. L'optique.

4. L'onde créée par le système électro-acoustique est en opposition de phase avec l'onde incidente. Elle peut être légèrement retardée. L'onde résultante, somme des ondes incidente et créée, est très fortement atténuée.



5. Le casque audio passif utilise des matériaux isolants uniquement. Un inconvénient possible lié à l'isolation active peut être la coupure avec le monde extérieur. L'isolation active est quasi indispensable sur une piste d'aéroport ou sur un chantier très bruyant.

D. Déroulement du cours

Les activités 1 et 2 peuvent être traitées à la suite l'une de l'autre en une séance (1 h 30). Il en est de même pour les activités 3 et 4. Une séance supplémentaire est nécessaire pour travailler les exercices.

E. Réponses aux exercices p.118-119

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 207.

5 1. Vitrage simple de 8 mm à 1 kHz :

$A = -10 \log(t)$ donc $t = 10^{-A/10} = 10^{-3}$.

Double vitrage avec deux plaques de 4 mm :
 $t = 3,16 \cdot 10^{-4}$.

2. L'air absorbe une partie du son. L'autre domaine est la conduction thermique, car l'air est un bon isolant thermique.

6 1. Le pavillon de l'oreille permet d'amplifier le son en le concentrant. Le tympan vibre et transmet mécaniquement la vibration sonore aux osselets, qui la transmettent à la cochlée. La vibration mécanique de la cochlée progresse plus profondément pour les sons les plus graves. Là où la cochlée vibre, les récepteurs sensoriels sont excités. Jusque-là, la transformation du son est mécanique.

Les récepteurs transmettent les informations aux nerfs, qui transforment le mouvement en signal électrique.

2. Le parallèle avec un microphone à induction est la vibration du tympan, qui correspond à celle de la membrane du microphone, puis la

transformation d'un signal mécanique en un signal électrique.

7 1. Une salle anéchoïque permet de minimiser les bruits « parasites » afin de mesurer l'intensité sonore émise par une source de bruits et de certifier la norme sonore de cette source.

2. Les cônes de mousse servent à absorber les sons de fréquence supérieure à 100 Hz.

3. L'onde incidente est absorbée par les cônes de mousse pour les fréquences supérieures à 100 Hz.

4. Le coefficient de réflexion de la mousse utilisée dans la chambre est quasi nul, alors que son coefficient d'absorption est maximal et vaut 1.

8 1. En utilisant les formules rencontrées dans les activités :

$$I = 10^{-12} \times 10^{115/10} = 0,316 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} ;$$

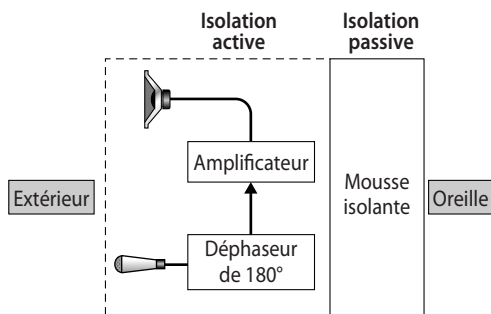
$$\Delta P = 2 \cdot 10^{-5} \times 10^{115/20} = 11,25 \text{ Pa}.$$

2. $\Delta P = 10^3 \text{ Pa}$ à 10 cm de profondeur, soit environ 100 fois plus que la surpression précédente.

3. Non, l'amplitude de la surpression n'est pas seule responsable, la durée trop importante de l'exposition au bruit est la cause fondamentale d'un dommage sur l'audition, mais la fréquence entre aussi en ligne de compte. L'ouïe est un filtre mécanique qui ne réagit qu'aux fréquences comprises entre 20 Hz et 20 kHz. Fort heureusement les remous, balançoire et autres phénomènes mécaniques atteignent rarement la fréquence de 20 Hz et la surpression ne produit pas de dommage sur l'audition. Les ailes d'insecte le peuvent parfois, d'où un bourdonnement ; de même les chocs qui ont parfois un spectre étendu, les moteurs et les instruments de musique, bien sûr, peuvent entraîner des dommages sur l'audition si leur intensité est trop élevée et la durée d'exposition trop longue.

9 1. Un casque à réduction de bruit sert à éviter les nuisances sonores provenant du milieu extérieur.

2.



3. Les opérations d'acquisition, de déphasage et d'amplification nécessitent une source d'énergie.

4. La mousse isolante permet une atténuation du bruit résiduel.

10 1. $L_s = 85 + 10 \log(t_c) = 62 \text{ dB}$;

Pour deux cloisons :

$$L_m = 85 + 2 \times 10 \log(t_c) = 39 \text{ dB} ;$$

$$L_v = 85 + 10 \log(t_m) = 37 \text{ dB}.$$

Le voisin n'est pas dérangé par Julien tant qu'il passe l'aspirateur. La sœur de Julien, en revanche, est dérangée par le bruit de la batterie. Sa mère l'est aussi, légèrement.

2. $L_j = 65 + 10 \log(t_m) = 17 \text{ dB}$. Julien n'est absolument pas dérangé par le voisin.

11 1. $I_{\text{train}} = 10^{-12} \times 10^{80/10} = 10^{-4} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$;

$$I_{\text{absorbée}} = 0,56 \times 10^{-4} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} ;$$

$$I_{\text{transmise}} = 10^{-4} \times 4 \cdot 10^{-7} = 4 \cdot 10^{-11} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Le niveau correspondant vaut 16 dB.

2. $I_{\text{réfléchi}} = I_{\text{train}} - I_{\text{absorbée}} - I_{\text{transmise}}$
 $= 4,4 \cdot 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$

3. Non, les élèves ne sont pas dérangés par le train.

12 1. L'inclinaison des gradins permet au son d'arriver au spectateur sans obstacle, quel que soit son rang.

2. Les alvéoles réduisent la réverbération due à l'arrière du théâtre. L'absence de plafond évite toute réflexion.

3. Les alvéoles du plafond réduisent la réflexion du plafond et diminuent ainsi la réverbération.

F. Réponses aux sujets BAC p.120-121

13 1. Pour toutes les fréquences étudiées, T_1 est plus faible que T_0 et que T_2 , donc le matériau 1 absorbe bien les sons, propriété recherchée pour les faux plafonds

2. $T_0 = \frac{0,16V}{S_0 \alpha_0}$ et

$$T_1 = \frac{0,16V}{S_0 \alpha_0 + S \alpha_1} = \frac{0,16V}{0,16 \frac{V}{T_0} + S \alpha_1}$$

$$\text{D'où } \alpha_1 = \frac{0,16V}{S} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) = 2,4 \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right).$$

3.

F (Hz)	250	500	1 000	2 000	4 000
α_1	0,60	0,84	0,91	0,79	0,72

4. α_1 doit être le plus grand possible. Ce matériau est très performant dans la bande d'octave autour de 1 000 Hz, donc pour les fréquences correspondantes aux sons les plus bruyants dans une piscine.

14 1. Plus le bruit est traité près des oreilles, plus le système est efficace. Le dispositif est donc installé dans la tête de chaque fauteuil.

2. Le transducteur 1 est le microphone. Il transforme le signal sonore en signal électrique, qui est analysé par le ordinateur. Le générateur de signaux fabrique un signal électrique de même fréquence, mais en opposition de phase avec le signal reçu. Le transducteur 2 est le haut-parleur. Il transforme le signal électrique en signal sonore de même fréquence.

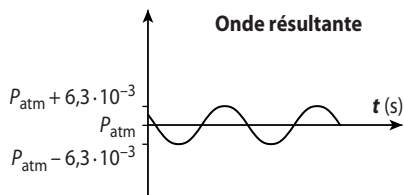
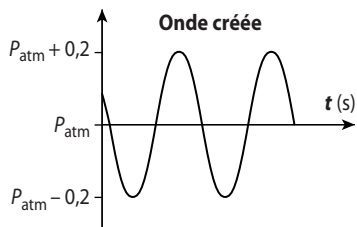
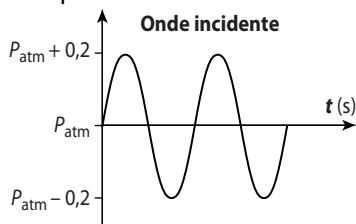
Ces composants doivent être miniaturisés afin de pouvoir être placés dans la tête du fauteuil, ils doivent supporter les variations de pression, les vibrations et les secousses de l'avion. Leur bande passante doit comporter les fréquences de 120 à 370 Hz

3. Les fréquences traitées sont 120, 250 et 370 Hz, ce qui correspond respectivement aux périodes 8,3 ms, 4,0 ms et 2,7 ms

4. Le son le plus fort a un niveau sonore de 80 dB (sans contrôle actif) ou de 50 dB (avec contrôle actif) pour une fréquence $F = 120$ Hz. Les ondes incidentes créée et résultante ont la même période $T = 8,33$ ms.

80 dB correspondent à $\Delta P = \Delta P_0 \cdot 10^{L/20} = 0,2$ Pa. De même, 50 dB correspondent à $\Delta P = 6,3 \cdot 10^{-3}$ Pa.

D'où les représentations suivantes.



L'onde créée est soit d'amplitude 0,2 Pa, mais avec un déphasage légèrement inférieur à 180° par rapport à l'onde incidente (voir figure), soit déphasée de 180° par rapport à l'onde incidente, mais avec une amplitude inférieure de $6,3 \cdot 10^{-3}$ Pa à celle de l'onde incidente.

5. Le casque contient un microphone miniaturisé qui transforme les sons en un signal électrique. L'analyseur de spectre réalise l'analyse spectrale du signal. Le générateur de signaux génère des signaux en opposition de phase avec ceux dont la fréquence est inférieure à 300 Hz. La parole a un spectre de fréquences dont les valeurs sont essentiellement supérieures à 300 Hz. Le haut-parleur transforme les signaux électriques en signaux sonores qui créent l'antibruit pour les basses fréquences.

G. Épreuve expérimentale p.122

1.1. $L = 10 \log (I/10^{-12})$. Le niveau sonore est en dB et l'intensité acoustique I est en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$.

$$\begin{aligned} \mathbf{1.2.} \quad A &= L_{\text{incident}} - L_{\text{transmis}} \\ &= 10 \log (I_{\text{incident}}/10^{-12}) - 10 \log (I_{\text{transmis}}/10^{-12}) \\ &= 10 \log (I_{\text{incident}}/I_{\text{transmis}}) \\ &= -10 \log (I_{\text{transmis}}/I_{\text{incident}}) = -10 \log(t). \end{aligned}$$

1.3. Chaque fréquence est le double de la fréquence immédiatement inférieure. Deux fréquences consécutives sont donc séparées d'une octave.

2.1. Le dispositif utilisé pour faire ces mesures peut être acheté à la société Jeulin. La mallette : acoustique, protection, isolation phonique, contient tout le matériel nécessaire pour réaliser les expériences de ce chapitre.

2.2. Les mesures ont été réalisées au cours de l'Activité 3 de ce chapitre et peuvent être alors exploitées par l'élève.

2.3. Il est possible de mesurer le coefficient de transmission d'une plaque de verre assez fine, puis de deux plaques de verre identiques accolées et de comparer les résultats. Ces résultats dépendent de la fréquence utilisée et de l'épaisseur des plaques.

3.1 et 3.2. Ces questions ont été traitées au cours de l'Activité 3

3.3. L'élève doit citer le double vitrage et l'association de matériaux tels que le bois et le polystyrène.

H. Science et société p.123

Développement durable. Étiquetage

1. Les mesures sont effectuées dans une chambre anéchoïque, aussi appelée salle sourde.

2. Un objet métallique ou bruyant est exclu de cette étude.

NB : dans l'unité « dB(A) » le « A » signifie *average-weighted*, soit « chargement moyen (ou standard) ».

L'abréviation complète est : dB(A) re 1 pW qui signifie : dB Average-weighted referred to 1 pW $\cdot \text{m}^{-2}$ (ou $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Santé. Prévention du bruit

1. Un niveau sonore de 60 dB relevé pendant les huit heures de nuit est majoré de 10 dB, soit au total $L_{\text{den}} = 70 \text{ dB}$.

2. L'intensité acoustique est multipliée par 10 lorsque le niveau sonore moyen varie de 60 dB à 70 dB. La surpression ΔP est multipliée par 3,16.

H. Bibliographie

- ✓ « Le monde des sons », *Pour la Science*, dossier n° 32, 2001.
- ✓ « Son et Musique. De l'art à la science », *Pour la Science*, n° spécial 373, nov. 2008.
- ✓ *Les cahiers techniques du bâtiment*, n° 177 et n° 195.
- ✓ R. Lamoral, *Acoustique et Architecture*, Masson, 1995.
- ✓ Centre d'information et de documentation sur le bruit, www.bruit.fr
- ✓ *Mesurage de l'absorption acoustique en salle réverbérante*, Norme française de l'AFNOR.

Chapitre 9

CYCLE DE VIE DES MATÉRIAUX

A. Le programme

Thème 3 : Matériaux

Domaine d'étude	Mots-clés
Cycle de vie	Élaboration • Vieillessement • Corrosion • Protection • Recyclage • Élimination

✓ **Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties**

- Écrire une demi-équation redox.
- Reconnaître l'oxydant ou le réducteur d'un couple.
- Écrire l'équation d'une réaction d'oxydoréduction en utilisant les demi-équations redox.
- Relier la polarité d'une pile aux réactions mises en jeu au niveau des électrodes.
- Reconnaître les groupes caractéristiques dans les alcool, aldéhyde, cétone, acide carboxylique, ester, amine, amide.
- Exploiter un spectre IR pour déterminer des groupes caractéristiques à l'aide de tables de données.
- Relier un spectre RMN simple à une molécule organique donnée, à l'aide de tables de données.
- Utiliser la représentation de Cram.
- Utiliser la représentation topologique des molécules organiques.
- Identifier les atomes de carbone asymétriques d'une molécule donnée.
- À partir d'une représentation, reconnaître si des molécules sont identiques, énantiomères ou diastéréoisomères.
- Pratiquer une démarche expérimentale pour synthétiser une molécule organique à partir d'un protocole.
- Réaliser un montage électrique.
- Rédiger une synthèse de documents pouvant porter sur l'actualité scientifique et technologique.

B. Démarche adoptée dans le manuel

Ce chapitre est construit autour de deux familles de matériaux : les métaux et les plastiques. Le programme de T^{erm} S spécialité invite ainsi à explorer divers aspects de la vie d'un matériau, identifiés par les mots-clés : élaboration, vieillissement, corrosion, protection, recyclage, élimination. Les activités de ce chapitre sont associées à des textes contenant un nombre relativement important d'informations. Les élèves seront ainsi mis en situation d'en extraire des informations pour les retranscrire sous une autre forme ou les exploiter.

Les deux premières activités s'intéressent aux métaux. La troisième est centrée sur les polymères. L'électrolyse, technique d'élaboration de métaux purs, bien que ne figurant pas dans le programme 2012, est introduite dans plusieurs exercices. Ce choix a été fait en raison de l'importance de ce procédé à l'échelle industrielle. Systématiquement, l'élève est amené à déduire du sens de déplacement des électrons dans les conducteurs métalliques, les transformations chimiques ayant lieu aux électrodes. Ce choix permet de réinvestir, dans un contexte différent, les compétences et connaissances vues en oxydoréduction en classes de 1^{re} S et de T^{erm} S.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p. 126

✓ Réponses aux questions

- Un polymère est dit biodégradable si des micro-organismes (bactéries, champignons, etc.) sont capables de le détériorer. Exemples : amidon, cellulose, protéines.
- Le cuivre subit une altération chimique due au milieu extérieur. Il est oxydé. L'élément cuivre se retrouve alors dans divers composés comme des oxydes, qui donnent une couleur verte à la surface du métal.
- Recycler un objet consiste à réintroduire, dans le processus de fabrication d'un nouvel objet, tout ou partie d'un objet ayant déjà été utilisé.

► S'interroger p. 126

✓ Réponses aux questions

Pour obtenir du verre, la silice est fondue en présence de divers composés appelés fondants, qui permettent notamment d'abaisser la température de fusion de la silice. Le refroidissement de la silice liquide permet l'obtention d'un verre.

► Introduction p. 127

Les façades métalliques subissent, avec le temps, des transformations chimiques dues au milieu extérieur. Parmi elles, la corrosion est un phénomène d'oxydation du métal. Certains métaux voient alors leurs propriétés se détériorer, d'autres au contraire, se retrouvent protégés d'une oxydation plus poussée.

► Activité 1 p. 128

Cette activité traite de l'hydrométallurgie du zinc. La première partie est constituée d'un texte présentant les différentes étapes du procédé. L'objectif pour les élèves est de comprendre que chaque étape permet d'éliminer des éléments non désirés parmi un mélange initial (minerai) qui en contient plusieurs.

L'activité est ensuite complétée par une expérience de précipitation des ions fer(III), simple à mettre en œuvre. Cette expérience est l'occasion d'une réflexion pratique sur les modalités

d'isolement d'un constituant au sein d'un mélange. La mesure du pH permettra de revenir sur des compétences du programme d'enseignement spécifique.

✓ Réponses aux questions

1. Diagramme illustrant la purification du minerai.

2. Le zinc est principalement utilisé pour protéger d'autres métaux de la corrosion, en particulier le fer (acier galvanisé). Le zinc est également présent dans certains alliages, comme les laitons (cuivre + zinc). Enfin, le zinc est utilisé pour la fabrication d'appareils électroménagers, de gouttières ou de toitures.

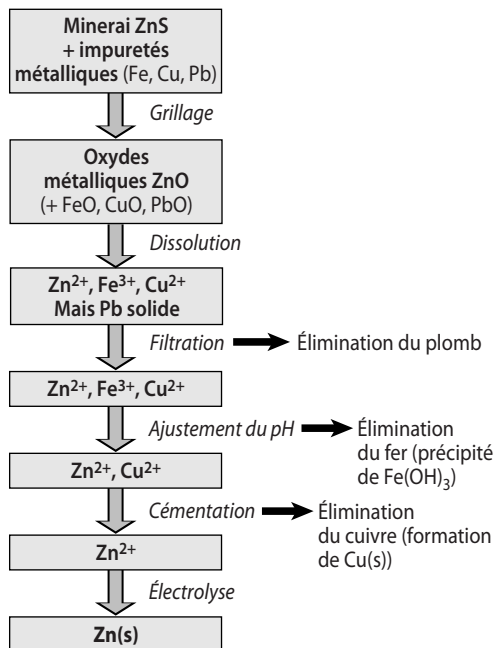
3. Les solutions B (cuivre) et C (zinc) conduisent à un précipité vers $\text{pH} = 6$, alors que la solution A (fer) conduit à un précipité vers $\text{pH} = 2$. En maintenant un pH inférieur à 5, on parvient à précipiter le fer sans précipiter les deux autres métaux.

4. Le protocole consiste à ajouter goutte à goutte de la soude dans le mélange de cations métalliques jusqu'à atteindre un pH d'environ 5. Un suivi pH-métrique est mis en place. Une filtration sur Büchner permet de recueillir un filtrat limpide, pratiquement exempt de fer.

5. Attention : il convient de s'assurer de l'utilisation de gants avec la solution de soude à $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Le pH-mètre doit être étalonné.

6. Le test aux ions thiocyanate devrait être conduit sur le mélange de départ et sur le filtrat pour comparaison.

7. Chaque étape d'un processus métallurgique vise à éliminer un des éléments présent dans le minerai naturel, mais non souhaité dans le composé final, ici un métal pur. L'activité expérimentale, par exemple, a permis d'isoler le fer du mélange fer, zinc et cuivre. La cémentation (voir partie A) permet d'éliminer le cuivre, etc. À l'issue de ces étapes, on récupère bien un métal pur.



► Activité 2 p. 129

La seconde activité est une activité documentaire centrée sur le phénomène de corrosion des métaux et sur des méthodes de protection. Sont ici envisagées essentiellement des méthodes de protection par dépôt étanche en surface du métal. Le document 4 permet de montrer que la couche de « rouille » est souvent constituée de plusieurs oxydes de fer.

✓ Réponses aux questions

1. $2 \text{ Fe(s)} + \text{O}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{ FeO(s)}$

2. Les oxydes de fer forment une couche non étanche qui n'empêche pas la diffusion du dioxygène vers le métal. L'oxyde de zinc forme au contraire une couche étanche.

3. Le zinc est protégé de la corrosion en surface par une couche d'oxyde de zinc. Son vieillissement est donc ralenti, ce qui est intéressant pour le revêtement d'une habitation. Des raisons économiques ont sans doute aussi favorisé le choix du zinc, comme l'abondance et/ou la proximité de mines.

4. Pour oxyder le métal en profondeur, le dioxygène doit diffuser à travers la couche d'oxydes. Plus cette couche est étanche, plus l'accès au métal est difficile. Il en résulte alors une vitesse de corrosion plus faible.

5. Le titane est, comme le zinc, oxydé en surface : l'oxyde de titane formé agit comme couche protectrice.

6. On peut protéger un métal en appliquant sur sa surface une couche constituée d'un matériau différent (peinture, vernis ou autre métal). Certains métaux se protègent « eux-mêmes » par la formation d'une couche d'oxyde étanche. Il s'agit donc là de méthode de protection par dépôt en surface du métal.

► Activité 3 p. 130

La troisième activité s'intéresse aux plastiques et s'organise autour de trois problématiques : synthèse, biodégradabilité et recyclage. Elle aborde des méthodes de tri souvent méconnues des élèves : le tri par flottation ou encore le tri optique, qui permet de réutiliser la spectroscopie IR vue dans l'enseignement spécifique.

La synthèse du PLA conduit à constater la plus grande viscosité du matériau par rapport au monomère.

Sécurité

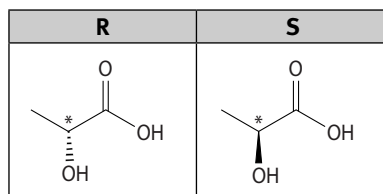
– Le port de lunettes et de gants est nécessaire pour la manipulation de l'acide sulfurique.

Matériel nécessaire

- Gants, lunettes de protection.
- Ballon bicol rodé ; réfrigérant à boules.
- Entonnoir à liquides ; pipette jetable.
- Éprouvette de 10 mL ; bécher de 50 mL.
- Thermomètre.
- Support élévateur ; chauffe-ballon.
- Acide lactique.
- Acide sulfurique concentré.
- Plaque de verre.

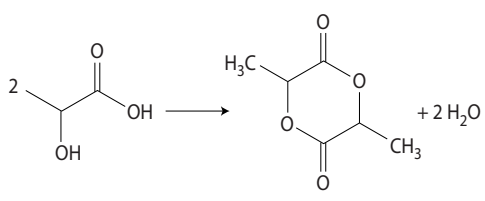
✓ Réponses aux questions

1. L'acide lactique possède un atome de carbone asymétrique (repéré par un astérisque ci-contre). Deux stéréoisomères de configuration énantiomères peuvent correspondre à cette formule :

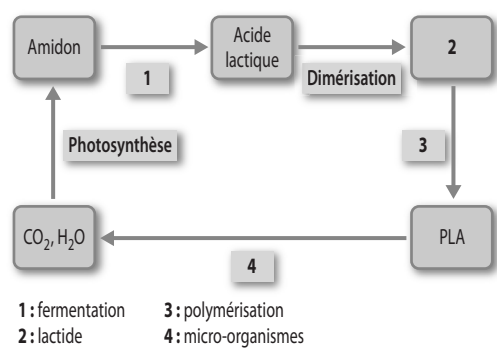


2. L'analyse des formules brutes met en évidence la formation de deux molécules d'eau lors de la dimérisation de l'acide lactique par estérification (acide lactique : $C_3H_6O_3$; lactide : $C_6H_8O_4$).

On peut donc proposer l'équation de réaction suivante :



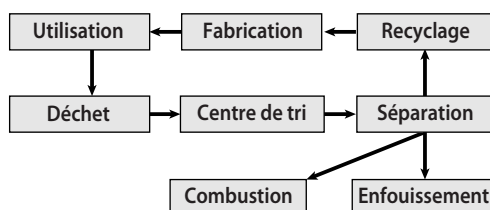
- 3. Le chauffage et le catalyseur accélèrent la réaction.
- 4. L'acide lactique possède un groupe carboxyle (–OC–OH) et un groupe hydroxyle (–OH). Le PLA possède des groupes ester (–CO–O–).
- 5. D'après le texte, le groupe ester est facilement clivable par les micro-organismes. Les chaînes peuvent être fractionnées par les micro-organismes.
- 6. Cycle de vie du PLA :



- 7. Les fils de suture en PLA se dégradent lentement en milieu biologique. Quelques semaines après leur pose, il est inutile d'aller voir le médecin pour qu'il enlève les fils.
- 8. Matériaux utilisés pour la fabrication d'objets du quotidien :

Objet	Polymère	Motif
Bouteille de lait	PE-HD	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$
Bouteille d'eau minérale	PET	$\left[\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2 \right]_n$
Plateau en plexiglas	PMMA	$\left[\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{CH}_2-\text{C} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$
Tuyau d'arrosage	PVC	$\left(\begin{array}{cc} \text{H} & \text{Cl} \\ & \\ -\text{C} & - & \text{C}- \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$

- 9. a.** Lors de la flottation, les matériaux plus denses que l'eau coulent (PET, PMMA, PVC) ; les matériaux moins denses que l'eau flottent (PE-HD).
- b.** Les objets doivent être totalement vidés d'air (la présence d'air à l'intérieur de l'objet entraîne une masse volumique de l'ensemble [plastique + air] différente de celle du plastique). Pour éliminer l'air, on peut, par exemple, couper les objets en morceaux suffisamment gros pour permettre l'identification de leur origine. Les morceaux sont ensuite immergés dans l'eau et la séparation s'opère.
- 10.** Les polymères contiennent des groupes fonctionnels et donc des liaisons covalentes différentes. En spectroscopie IR, les bandes observées traduisent des vibrations de la molécule. Si les liaisons sont différentes, les vibrations ne se produisent pas aux mêmes fréquences, ce qui permet l'identification du matériau.
- 11.** Seulement 1 % des plastiques sont orientés sur un tapis qui n'est pas le leur, par suite d'une erreur d'identification.
- 12.** Cycle de vie d'un plastique :



D. Déroulement du cours

Deux séances de deux heures semblent nécessaires pour traiter ce chapitre.

La première peut s'intéresser aux métaux : activité 1 ou 2 (1 h), exercices et sujets Bac/ECE (1 h).

La seconde portera sur les polymères : activité 3 (1 h 30), sujet Bac et exercices (1 h).

E. Réponses aux exercices p. 134-135

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 207.

6 1. La combustion de $1,0 \text{ t} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg}$ libère $44 \text{ GJ} = 12,103 \text{ kWh} = 1,1 \text{ tep}$.

2. La production électrique correspond uniquement à la moitié de l'énergie libérée par la combustion, soit 22 GJ .

3. $\frac{22}{120} = 0,18$: en brûlant une tonne de PE, on dispose de l'énergie nécessaire pour fabriquer 180 kg de PE.

7 1. Le gonflement de la boîte est dû à la formation de dihydrogène, gaz produit par réduction du fer par l'eau selon l'équation :

$$\text{Fe(s)} + 2 \text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O(l)}$$

2. Localement, la boîte peut être assimilée à un cylindre de section $S = \pi r^2$ et d'épaisseur e . Le volume de fer consommé est $V = Se = \pi r^2 e = 6,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$, soit une masse de fer réduit $m_{\text{Fe}} = 4,9 \cdot 10^{-5} \text{ kg} = 49 \text{ mg}$.

3. La quantité de matière de fer consommé est $n_{\text{Fe}} = 8,8 \cdot 10^{-4}$ mol. L'utilisation de l'équation de réaction amène à trouver la quantité de dihydrogène formé : $n(\text{H}_2) = 8,8 \cdot 10^{-4}$ mol, ce qui représente un volume de dihydrogène de 21 mL.

8 1. La transformation est l'inverse de la polymérisation : on forme ici le monomère (styrène) à partir du polymère (polystyrène). Il y a dépolymérisation.

2. Ces signaux correspondent aux atomes d'hydrogène portés par la double liaison $\text{C}=\text{C}$ à l'extérieur du cycle benzénique. Les valeurs des déplacements chimiques de ces signaux sont compatibles avec celles trouvées dans les tables de données RMN ^1H .

3. À partir du styrène recyclé, il est possible de fabriquer à nouveau du polystyrène. Cependant, le procédé n'est pas utilisé à l'échelle industrielle en raison de son coût énergétique.

9 1. En supposant les tôles parfaitement parallélépipédiques de surface latérale S et d'épaisseur e , l'expression du volume d'acier est :

$V = Se = \frac{m}{\rho_{\text{eau}} d}$. Or la masse de la Tour Eiffel correspond à $1/40$ des 250 tonnes de peinture restantes, soit de l'ordre de $m \approx 40 \times 250 = 10^4$ t = 10^7 kg. Donc l'épaisseur des pièces d'acier est de l'ordre de $e \approx \frac{10^7}{2,5 \cdot 10^5 \times 10^3 \times 7} \approx 6$ mm.

2. Les 60 t de peinture représentent un volume d'environ environ 30 m^3 (densité de l'ordre de 2). En négligeant les côtés des tôles parallélépipédiques, la surface à couvrir par

de la peinture est $2S = 5,105 \text{ m}^2$, d'où une épaisseur de couche de peinture $e' \approx 60 \text{ } \mu\text{m}$.

3. La peinture empêche les oxydants contenus dans l'air ou les eaux de pluie d'accéder au métal pour le corroder.

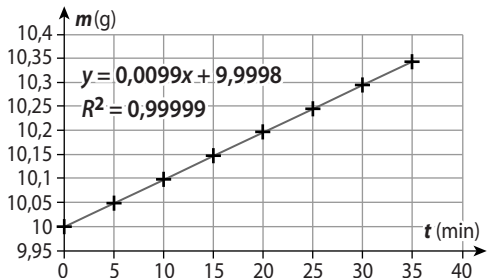
10 1. Les électrons se déplacent, dans les fils électriques, en partant de la borne (-) du générateur et arrivent à la borne (+) du générateur.

2. Les électrons arrivent donc à l'électrode de droite où ils sont utilisés : une espèce doit y gagner des électrons. Cette électrode est appelée cathode (car il s'y produit une réduction) : $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{Cu(s)}$.

À l'autre électrode (gauche), il se produit une oxydation (anode) : $\text{Cu(s)} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{e}^-$.

3. L'électrode de gauche se dissout : elle qui doit être constituée par le cuivre impur. Le cuivre pur est formé à l'électrode de droite.

4. a. La courbe $m = f(t)$ a l'allure d'une droite.



b. On peut modéliser la courbe par une équation du type $m = at + b$. À partir du tracé, on détermine l'ordonnée à l'origine et le coefficient directeur : $m = 0,0099 t + 10$.

c. On atteint $m = 15,0$ g pour $t = 505$ min, soit une durée d'électrolyse d'environ 8 h 25 min.

F. Réponses aux sujets BAC p. 136-137

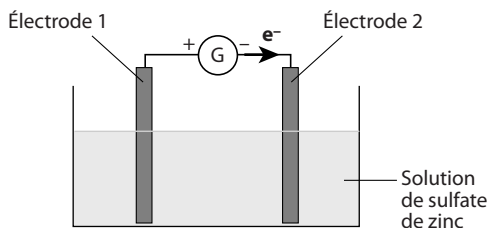
11 1. Dans les deux cas, une couche de zinc est déposée à la surface du métal.

Électrozingage : dépôt par électrolyse.

Galvanisation : dépôt par immersion dans un bain de zinc fondu. Par refroidissement,

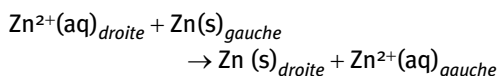
le zinc liquide devient solide et forme une couche protectrice en surface de la pièce métallique.

2. Les électrons partent de la borne négative du générateur.



3. La formation du zinc est une réduction. Elle nécessite un apport d'électrons. La pièce à recouvrir de zinc doit être fixée à la borne (-) du générateur.

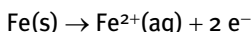
4. L'autre électrode est en zinc. Il s'y déroule une oxydation : $\text{Zn(s)} \rightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$. La réaction de fonctionnement a donc pour équation :



La consommation des ions Zn^{2+} à la cathode est compensée par leur formation à l'anode. La concentration molaire des ions Zn^{2+} reste constante dans le bain. Un remplacement de l'électrode de gauche doit être prévu quand elle est totalement consommée.

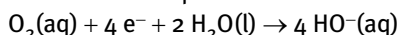
5. Vitesse de dépôt : $1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Pour avoir un dépôt d'épaisseur de $70 \mu\text{m}$, il suffit de 4 secondes.

12 1. Pointe et tête du clou présentent un dépôt bleu, signe de la formation d'ions Fe^{2+} (le fer y est donc corrodé/oxydé) selon la réaction d'équation :

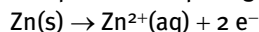


Le corps du clou présente une coloration rose, signe de la formation d'ions HO^- (le milieu est devenu basique).

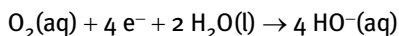
Le dioxygène a été réduit dans cette zone, selon la réaction d'équation :



2. Plaque de zinc : le dépôt blanc témoigne de la formation d'ions Zn^{2+} (le zinc a été corrodé, mais pas le fer qui est ainsi protégé) :

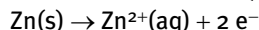


Clou : la coloration rose prouve la formation d'ions HO^- :

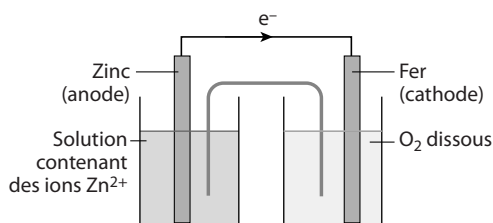
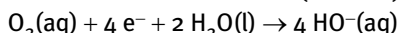


3. Schéma de la pile ci-dessous : elle est court-circuitée car les deux métaux sont en contact direct.

Oxydation sur l'électrode de zinc (anode) :



Réduction sur l'électrode de fer (cathode) :



4. Le contact fer-zinc crée une pile : une réduction a lieu sur l'électrode de fer qui est donc protégée de la corrosion. Il ne s'oxyde pas, car c'est l'autre électrode qui est oxydée (ici le zinc). Le contact entre les deux métaux est nécessaire pour assurer la circulation des électrons d'une électrode vers l'autre. L'hélice n'est pas corrodée.

5. L'oxydation du zinc consomme ce métal. Il est donc nécessaire de changer périodiquement les blocs de zinc. Le métal à protéger constitue ainsi la cathode d'une pile. L'anode, bloc de zinc, se retrouve consommée au cours du processus et doit être remplacée. L'anode est donc « sacrifiée » pour protéger le métal qui sert de cathode. On parle donc de protection cathodique à anode sacrificielle.

G. Épreuve expérimentale p. 138

Cette activité permet d'illustrer le problème de la récupération de cations polluants pour éviter leur déversement dans les rivières en sortie d'usine. Ici, l'électrolyse d'une solu-

tion contenant des ions Sn(II) est réalisée. Ce dispositif permet de réinvestir de nombreuses compétences de l'enseignement spécifique.

L'élève est amené à se poser des questions sur les transferts de porteurs de charge dans le circuit. D'autre part, il est invité à faire varier certains paramètres au cours de l'expérience pour constater l'existence d'une tension seuil d'électrolyse. Enfin, un test permet de valider l'hypothèse sur l'équation de la réaction de fonctionnement.

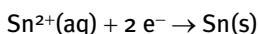
Sécurité

Les solutions utilisées sont très corrosives : l'utilisation de gants et de lunettes de protection est indispensable.

La formation de dichlore à l'anode impose une durée d'électrolyse pas trop longue.

✓ Réponses aux questions

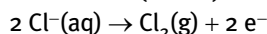
1.1 L'étain doit être réduit :



1.2. Les électrons partent de la borne négative du générateur : ils sont consommés à l'électrode de droite. Cette électrode est donc le

siège de la réduction des ions $\text{Sn}(\text{II})$: on y constate le dépôt d'étain solide.

1.3. À l'autre électrode (anode) :



La réaction de fonctionnement de l'électrolyseur est : $\text{Sn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Cl}^{-}(\text{aq}) \rightarrow \text{Sn}(\text{s}) + \text{Cl}_2(\text{g})$

2.2. La formation de bulles de dichlore à l'anode n'est observée que si la tension délivrée par le générateur dépasse une valeur seuil, qui est de l'ordre de 1,5 V.

2.3. L'intensité peut être modifiée grâce au boîtier de résistance variable. L'introduction de quelques gouttes de la solution d'indigo du côté de l'anode permet de mettre en évidence le dichlore formé.

3. Le test à l'indigo indique que l'anode a été le siège d'une oxydation des ions chlorure Cl^{-} . L'autre électrode a été le siège d'une réduction des ions Sn^{2+} . Le dépôt d'étain métallique est visible à la surface de l'électrode.

H. Sciences et société p. 139

Technologie. Apports innovants de la chimie au quotidien

Les réponses aux deux questions se trouvent dans le salon.

1. La couche d'argent intégrée dans les vitrages se comporte comme un miroir réfléchissant les rayonnements infrarouges, mais reste transparente dans le visible. Cette innovation

permet de diminuer les pertes thermiques en hiver et tend à diminuer la consommation énergétique.

2. Les mousses rencontrées dans les coussins ou les matelas sont le plus souvent réalisées en polyuréthanes. La formation de gaz lors de la synthèse du polymère permet l'obtention d'une mousse : les bulles de gaz sont alors piégées au sein de la matrice polymère.

I. Compléments pédagogiques

Les énoncés sont disponibles sur www.libtheque.fr/physiquechimie

► Corrigés

1 1. Le monomère est le propène : $\text{CH}_3\text{--CH=CH}_2$.

2. Les carbones porteurs des groupes méthyle sont asymétriques.

3. Les chaînes ne sont pas superposables sans être images l'une de l'autre dans un miroir plan : ce sont des diastéréoisomères.

2 1. L'or pur est l'or à 24 carats (il y a 24 g d'or dans 24 g « d'alliage »).

2. Dans 24 g d'alliage à 18 carats, il y a 18 g d'or (soit 91 mmol) et 6 g de cuivre (94 mmol), soit pratiquement la même quantité d'atomes d'or et que d'atomes de cuivre.

3 1. Les plastiques sont d'abord broyés. Le mélange est introduit dans du solvant à température ambiante. La solution est chauffée légèrement au-dessus de 25 °C : les débris de polystyrène se dissolvent dans le solvant. Les autres plastiques restent à l'état solide (ils ne sont pas dissous par le solvant à cette température). Par filtration à température constante, on sépare les débris solides et le solvant. Le

solvant est ensuite refroidi à une température inférieure à 25 °C : le polystyrène redevient solide. On le récupère par filtration. Cette succession d'opérations a permis d'isoler le PS des autres polymères.

On reproduit ce protocole à une température légèrement supérieure à 75 °C (respectivement 105 °C, 118 °C et 138 °C) pour récupérer le PE-BD (respectivement le PE-HD, le PP et le PVC).

2. Manipulation en enceinte fermée, contrôle des effluents pour éviter le rejet de xylène. Le procédé n'est, à ce jour, pas utilisé en raison de la haute toxicité du solvant.

J. Bibliographie

- ✓ L. Priester, *Les matériaux*, CNRS Éditions, 2008.
- ✓ C. Duval, *Matières plastiques et environnement*, 2^e édition, Éditions Dunod, 2009.
- ✓ M. Defrancheschi, *La chimie au quotidien*, Éditions Ellipses, 2005.
- ✓ P. Bihouix et B. de Guillebon, *Quel futur pour les métaux*, EDP Sciences, 2010.
- ✓ J. Sarrazin et M. Verdaguer, *L'oxydoréduction*, Éditions Ellipses, 1991.
- ✓ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie : www.ademe.fr

Chapitre 10

PROPRIÉTÉS ÉLECTRIQUES DES MATÉRIAUX

A. Le programme

Thème 3. Matériaux

Domaine d'étude	Mots-clés
Structure et propriétés	• Conducteurs • Supraconducteurs • Cristaux liquides • Semi-conducteurs • Photovoltaïques

✓ **Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties**

- Extraire et exploiter des informations sur l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation des sources de rayonnements de l'Univers.
- Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.
- Effectuer une analyse critique de protocoles expérimentaux pour identifier les espèces mises en jeu, leurs quantités et les paramètres expérimentaux.

B. La démarche adoptée dans le manuel

Le chapitre est défini par cinq mots-clés. La résistivité d'un matériau est rapidement introduite, car elle permet de relier entre eux les mots-clés conducteurs, semi-conducteurs et supraconducteurs. L'effet photovoltaïque s'inscrit comme un complément du mot-clé semi-conducteur. Enfin, le parti pris ici est de mettre en avant les applications dans la vie quotidienne des cristaux liquides : leur comportement remarquable sous l'effet d'un champ électrique incitait à les placer dans ce chapitre plutôt que dans un autre.

Tout au long du chapitre, on a cherché à évacuer toute virtuosité mathématique, en faveur d'une plus grande compréhension des phénomènes physiques et chimiques par l'élève ; compréhension qui s'effectue à travers le plus grand nombre d'expériences. Les activités documentaire et d'investigation et les trois sujets Bac constituent certainement un exemple de démarche d'enseignement et d'évaluation par compétences.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► **Vérifier ses acquis** p. 140

✓ **Réponses aux questions**

- La loi d'Ohm : $U = RI$, avec R la résistance du conducteur ohmique.

- Tous les solides ne sont pas des conducteurs électriques : certains sont des isolants. Les bons conducteurs électriques sont les métaux.
- Sources de champ magnétique : les matériaux ferromagnétiques ; les boucles de courant électrique (tout courant électrique génère un champ magnétique).

► S'interroger p. 140

Un aimant crée autour de lui un champ magnétique qui traverse tout matériau non magnétique, comme ici la pastille noire. En revanche, quand la pastille devient supraconductrice à basse température, elle devient imperméable au champ magnétique. Le mécanisme est le suivant : la pastille produit à sa surface des courants électriques qui engendrent un champ magnétique compensant exactement le champ magnétique créé par l'aimant : c'est l'effet Meissner. Le champ magnétique de l'aimant agit sur les courants créés, provoquant une force répulsive (du type force de Laplace : voir chapitre 7, activité 3, page 100 du manuel).

► Introduction p. 141

Un cristal liquide est un matériau dont les propriétés sont intermédiaires entre celles d'un liquide et celles d'un solide cristallin (d'où son nom).

Par exemple, lorsqu'on chauffe la plupart des corps purs solides, la pression étant fixée, ils présentent une transition vers un état liquide à une température fixée. Au contraire, un cristal liquide passe par une ou plusieurs phases intermédiaires (dites « mésophases »), avant de rejoindre la phase liquide.

Les différentes mésophases peuvent être distinguées par leurs propriétés optiques (comme la biréfringence). Vu au microscope sous lumière polarisée, un matériau à cristaux liquides semble être composé de « zones » de couleurs distinctes. Chaque « zone » correspond à un domaine où les molécules sont orientées dans une direction donnée.

► Activité 1 p. 142-143

Dans cette activité, on se propose de synthétiser un cristal liquide, de le purifier et de mettre en évidence certaines de ses propriétés (action sur la direction de polarisation d'une lumière polarisée ; non unicité du point de fusion).

Matériel

- Deux ballons.
- Éprouvette graduée de 10 mL ; bécher de 100 mL.
- Réfrigérant à eau vertical ;
- Pipettes pasteur ; cristalliseur ; büchner ; boîte de Pétri.
- Valet ; chauffe-ballon ; bain-marie ; thermomètre.
- Balance au centième de gramme.
- Papier-filtre.
- Lames de microscope ; deux plaques de polaroid.
- Sèche-cheveux, rétroprojecteur.
- Banc Köfler.
- 4-heptyloxybenzaldéhyde ; 4-butylaniline ; éthanol absolu ; acide éthanoïque pur ; glace.

NB : la quantité de matière de chaque réactif est volontairement réduite car ils sont coûteux et nocifs.

✓ Réponses aux questions

1. Le 4-heptyloxybenzaldéhyde et la 4-butylaniline sont des produits dangereux par inhalation, par contact avec la peau et par ingestion, ce qui impose de les manipuler sous la hotte avec port de gants et de lunettes.

2. L'éthanol pur permet une meilleure homogénéité du mélange des réactifs.

3. L'acide éthanoïque pur fournit des ions H^+ qui catalysent la réaction.

4. Lors du refroidissement, l'imine précipite.

5. L'éthanol froid est préféré à l'éthanol à température ambiante, car la solubilité de l'imine dans celui-ci diminue avec la température.

6. D'après l'encadré « s'informer », le protocole proposé est bien celui d'une purification par recristallisation. En effet, le solide synthétisé est dissous dans une faible quantité de solvant et précipite ensuite par refroidissement.

7. a. On note n_1 le nombre de moles du 4-heptyloxybenzaldéhyde et n_2 celui de la 4-butylaniline.

$$n_1 = \frac{m_1}{M_1} = \frac{0,44}{220} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ mol.}$$

$$n_2 = \frac{m_2}{M_2} = \frac{0,32}{149} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mol.}$$

b. Si la transformation était totale, il devrait se former $2,0 \cdot 10^{-3}$ mol d'imine, soit une masse de $2,0 \cdot 10^{-3} \times 351 = 0,70$ g d'imine.

c. Le rendement de la synthèse est le rapport de la masse d'imine obtenue après purification sur la masse attendue soit 0,70 g. Le rendement attendu est de l'ordre de 70 à 80 %.

8. a. Les axes de chaque polaroïd sont orthogonaux entre eux.

b. L'eau et l'éthanol ne modifient pas la direction de polarisation d'une lumière polarisée.

c. L'état cristal liquide modifie la direction de polarisation d'une lumière polarisée : on dit qu'il possède un pouvoir rotatoire. Le phénomène est observé en chauffant le cristal liquide à l'aide d'un sèche-cheveux : en effet, l'état cristal liquide n'existe que sur une plage de température déterminée.

9. Un solide pur est caractérisé par sa température de fusion. Un cristal liquide ne se comporte pas comme un solide pur lorsqu'il fond. Il présente un état cristal liquide sur une plage de températures donnée, avant de rejoindre la phase liquide (voir plus haut dans ce chapitre, le paragraphe **Introduction**).

10. Un cristal liquide possède un domaine de fusion sur une plage de température. L'état cristal liquide permet de modifier la direction de polarisation d'une lumière polarisée.

► Activité 2 p. 144

Dans cette activité, à partir d'une problématique et après une présentation du matériel disponible, l'élève doit proposer un protocole expérimental, le réaliser et valider une loi. Cette activité est très proche de ce qui sera demandé à l'élève lors de l'épreuve d'évaluation des compétences expérimentales (ECE) du baccalauréat.

✓ Réponses aux questions

1. L'agitateur permet d'homogénéiser la température de l'eau.

2. La résistance du platine croît lorsque la température croît (doc. 6, courbe rouge).

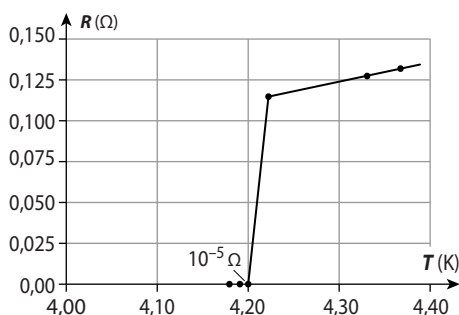
3. La résistance d'un semi-conducteur d'une thermistance CTN décroît lorsque la température croît (doc. 6, courbes verte et bleue).
4. La thermistance CTN est caractérisée par sa sensibilité thermique B et par sa résistance R_0 à la température de 298 K. La valeur de B est très voisine de 4 000 K et celle de R_0 très proche de 1 000 Ω . R_0 explique le nom de la thermistance.

► Activité 3 p. 145

Dans cette activité, on se propose de découvrir la supraconductivité et de la caractériser. Une démarche historique est mise en œuvre et l'activité repose sur une exploitation du site Internet dont l'adresse est donnée p. 145 du manuel : www.supraconductivite.fr/fr/index.php#100ans-film

✓ Réponses aux questions

1. Les mesures de résistances ont été faites avec un galvanomètre à aiguille, qui était tenu éloigné des vibrations des pompes du dispositif de cryogénie. Le galvanomètre enregistrerait les variations de l'intensité du courant dans le mercure lorsqu'il était refroidi.
2. Les thermomètres à gaz et les thermomètres à résistance d'or ou de platine permettaient la lecture de la température.
3. Le cryogéniste a pompé la vapeur présente au-dessus de l'hélium liquide pour le refroidir.
4. Le mercure a perdu toute résistivité en dessous de 4,2 K.
5. La résistance tombe rapidement à zéro lorsque la température du matériau devient inférieure à sa température critique (4,2 K dans le cas du mercure, ci-dessous).



6. Un supraconducteur ne permet pas à un champ magnétique d'exister en son volume : c'est l'effet Meissner.
7. Pour réaliser $\vec{B} = \vec{0}$ en son volume, le supraconducteur développe des boucles de courant supraconducteur en surface. Ces boucles génèrent un champ magnétique à l'intérieur du matériau (comme le fait une spire) qui s'oppose au champ appliqué, de telle sorte que la somme de deux champs est nulle à l'intérieur du supraconducteur.

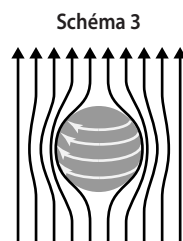
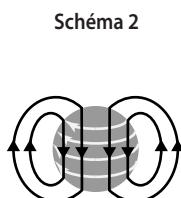
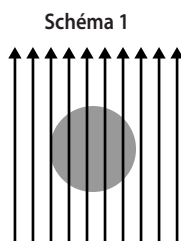


Schéma 1 : matériau n'interagissant pas avec le champ magnétique extérieur ; les lignes de champ magnétiques ne sont pas modifiées par sa présence.

Schéma 2 : sous l'effet du champ magnétique extérieur (non représenté), des courants naissent en surface du supraconducteur générant un champ magnétique dont on a représenté les lignes de champ.

Schéma 3 : la résultante du champ magnétique extérieur et du champ magnétique créé par le supraconducteur est nulle en tout point de son volume. Le supraconducteur semble donc « imperméable » au champ magnétique extérieur (on a représenté ci-avant les lignes de champ magnétique total).

8. Pour un supraconducteur de type I, lorsque le champ magnétique appliqué devient trop élevé, l'effet Meissner disparaît : le supraconducteur ne peut plus expulser le champ magnétique. En revanche, pour un supraconducteur de type II, il existe une plage de valeurs du champ magnétique pour laquelle l'expulsion du champ interne est partielle. Le matériau laisse alors pénétrer en partie le champ magnétique le long de « vortex ».

9. La supraconductivité se caractérise par deux propriétés remarquables :

- l'absence de résistivité en dessous d'une température critique T_c ;
- l'annulation du champ magnétique à l'intérieur du supraconducteur : effet Meissner.

D. Déroulement du cours

La totalité du chapitre peut être traitée en onze heures, mais l'enseignant peut faire le choix de ne présenter que quelques mots-clés, ce qui permettra de réduire le volume horaire.

Séance de TP

- Activité 1 (4 h).

Séance de TP

- Activité 2 (2 h).

Séance d'activité documentaire

- Activité 3 (2 h).

Exercices et sujet Bac au choix : 1 h + 1 h.

Bilan du chapitre sous la formation d'un essentiel : 1 h.

E. Réponses aux exercices p.148-149

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 208.

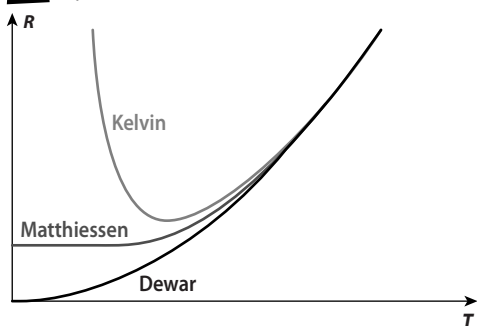
4 1. L'atome de carbone possède quatre électrons externes.

2. Pour qu'un matériau soit conducteur, il doit disposer d'électrons de conduction, non attachés à un atome spécifique. Le carbone étant tétravalent, il faut donc choisir la structure dans laquelle chaque atome de carbone est lié à trois plus proches voisins par des liaisons covalentes et non à quatre plus proches voisins. Le quatrième électron de valence est alors engagé dans une liaison plus faible avec

un atome carbone plus lointain qu'un plus proche voisin et est susceptible d'avoir plus de mobilité. La structure B est donc celle du graphite.

$$3. n = \frac{\mu N_A}{M} = \frac{19,3 \cdot 10^3 \times 6,02 \cdot 10^{23}}{197 \cdot 10^{-3}} \\ = 5,90 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3} \approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}.$$

4. On compare 10^{18} électrons $\cdot \text{cm}^{-3}$ à 10^{23} électrons $\cdot \text{cm}^{-3}$. Dans le graphite, la densité d'électrons libres est 100 000 fois plus faible que dans un métal. Le graphite est un semi-métal.

5 1.

Aujourd'hui, nous savons que la théorie de Kelvin est fautive. Il considérait que les électrons libres d'un métal pouvaient être décrits comme un gaz d'électrons. Il a fait abstraction des cations du réseau cristallin.

2. a. Voir Activité 3, réponse à la question 5.
- b. L'état supraconducteur.

6 1. Lorsque la vitre n'est pas soumise à une tension électrique (position OFF), la lumière est renvoyée dans toutes les directions et l'aspect de la vitre est laiteux. En revanche, lorsqu'une tension électrique est appliquée à la vitre (position ON), les molécules de cristal liquide s'orientent toutes dans la même direction et les rayons lumineux ne sont plus déviés. La vitre est alors transparente.

2. Lorsque la vitre est en position OFF, le phénomène lumineux qui opère est la diffusion.

7 Cet exercice s'inscrit dans le prolongement de l'activité 1 (p. 142-143 du manuel) et aborde une application du pouvoir rotatoire d'un cristal liquide.

1. Sur la figure A, aucun champ électrique n'est appliqué entre les deux lames de verre métallisées. En effet, contrairement à la figure B, aucun générateur de tension continue n'y est représenté. En l'absence de champ électrique, les molécules très allongées du cristal liquide forment des sortes d'escaliers en colimaçon dont elles seraient les marches. On peut parler aussi de disposition en hélice des molécules, ou de torsion de l'organisation des molécules. Elles effectuent un quart de tour.

2. De la lumière est présente en sortie de l'analyseur. L'ensemble du dispositif est donc transparent à la lumière.

Complément : si le professeur a choisi de traiter l'activité 1 et d'approfondir l'aspect « pouvoir rotatoire » du cristal liquide, il pourra ici commenter davantage la figure A. Cette dernière représente deux polariseurs croisés : le premier a pour effet de polariser la lumière naturelle. Le cristal liquide fait tourner la direction de polarisation de 90° , de sorte que si la direction de polarisation du second polariseur était parallèle au premier, il n'y aurait pas de lumière transmise. Comme, au contraire, le second polariseur est croisé avec le premier, la lumière est transmise.

3. Les molécules de cristal liquide s'alignent perpendiculairement aux électrodes, suivant la direction du champ électrique (figure B).

4. L'ensemble du dispositif est maintenant opaque à la lumière. En effet, l'analyseur ne laisse pas passer la lumière qui l'illumine.

Complément : à nouveau, si le professeur a choisi lors de traiter l'activité 1 et d'approfondir l'aspect « pouvoir rotatoire » du cristal liquide, il pourra ici commenter davantage les figures A et B.

Figure A. Elle représente deux polariseurs croisés : le premier a pour effet de polariser la lumière naturelle. Le cristal liquide fait tourner la direction de polarisation de 90° , de sorte que si la direction de polarisation du second polariseur était parallèle au premier, il n'y aurait pas de lumière transmise. Comme, au contraire, le second polariseur est croisé avec le premier, la lumière est transmise.

Figure B. Le premier polariseur a pour effet de polariser la lumière naturelle. Le cristal liquide, désormais placé dans un champ électrique, ne fait plus tourner la direction de polarisation de la lumière de sorte que, le second polariseur étant croisé avec le premier, il n'y a pas de lumière transmise.

- 8 1.** Le meilleur conducteur est le cuivre, car il a la plus faible résistivité pour une température donnée.

2. La résistance dépend de la forme du métal, contrairement à la résistivité qui ne dépend que de la nature du métal.

3. La résistivité d'un métal diminue en fonction de la température.

4. Quand la température baisse, les vibrations thermiques des cations du réseau métallique diminuent, les électrons de conduction sont moins fréquemment diffusés et la résistivité diminue.

5.

$$N = nSl = \frac{8,47 \cdot 10^{22}}{10^{-6}} \times 10 \times \pi (5 \cdot 10^{-4})^2 = 6,7 \cdot 10^{23}$$

6.

$$n_{\text{atomes}} \approx \frac{\pi \times (5 \times 10^{-4})^2 \times 10}{\frac{4}{3} \times \pi \times (135 \times 10^{-12})^3} = \frac{3 \times 25 \times 10^{23}}{4 \times (1,35)^3} = 7,6 \times 10^{23}$$

Soit environ 1 électron libre par atome de cuivre : lors de la formation du solide métallique, chaque atome de cuivre est en moyenne devenu un ion Cu^+ en libérant un électron de conduction.

Remarque : seules les notions de solide ionique et de solide moléculaire ont été abordées dans les programmes de 1^{re} S et Term S (enseignement spécifique). Cet exercice est l'occasion de parler de « solide métallique » et de signaler que la cohésion de cette matière est assurée par l'interaction entre le réseau de cations et les électrons de conduction.

9

$$\frac{I}{e} = \frac{8}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,3 \cdot 10^{19} \text{ électrons par seconde.}$$

$$P = UI = 8 \times 0,6 = 4,8 \text{ W}$$

$$10^3 \text{ W} \times (15 \cdot 10^{-2})^2 \approx 24 \text{ W}$$

$$\frac{hc}{\lambda_{\text{moy}}} n_e \approx E = P \Delta t$$

$$\Rightarrow \frac{n_e}{\Delta t} \approx \frac{P \lambda_{\text{moy}}}{hc} = \frac{24 \times 600 \cdot 10^{-9}}{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}$$

$$= 7,3 \cdot 10^{19} \text{ photons par seconde.}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{fournie}}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{4,8}{24} = 0,20 \text{ soit } 20 \%$$

$$\frac{5,3 \cdot 10^{19}}{7,3 \cdot 10^{19}} = 0,73, \text{ soit environ } 70 \%$$

F. Réponses aux sujets BAC p. 150-152

10 1. La différence minimale d'énergie entre un état d'un électron dans la bande de valence et celui dans la bande de conduction est le « gap », noté E_g . Comme $E_g = \frac{hc}{\lambda}$, cette différence minimale d'énergie correspond à une longueur d'onde maximale λ_{max} des photons susceptibles d'être émis ou absorbés telle que : $\lambda_{\text{max}} = \frac{hc}{E_g} = 1,1 \text{ } \mu\text{m}$. Tous les photons dont la longueur d'onde est inférieure à $1,1 \text{ } \mu\text{m}$ peuvent être absorbés par le silicium.

2. Le domaine de la lumière visible est compris entre 400 et 700 nm. Ces longueurs d'onde sont inférieures à $1,1 \text{ } \mu\text{m}$. Toute la lumière visible est donc absorbée par la cellule photovoltaïque constituée de silicium. Cette dernière apparaît donc noire.

3. Les photons d'énergie inférieure à 1,1 eV (de longueur d'onde supérieure à $1,1 \text{ } \mu\text{m}$) ne sont pas absorbés, bien qu'arrivant sur la cellule. En effet, ils représentent 23 % de l'énergie totale rayonnée par le Soleil et atteignent en partie le sol, car l'atmosphère présente des zones de transparence pour ce type de rayonnement (document 4). Un calcul plus précis indiquerait que les photons d'énergie inférieure à 1,1 eV représentent au sol 12,7 % de l'énergie solaire. C'est une des causes du rendement limité de la cellule.

4. On pourrait augmenter le gap pour récupérer plus d'énergie par photon. Mais alors le nombre de photons captés serait diminué. En fait, l'empilement de couches successives de matériaux à gaps différents et décroissants depuis la surface éclairée est une solution intéressante. Chaque couche récupère plus

d'énergie par photon qu'une couche avec un gap plus bas. La lumière qui n'a pas été absorbée par la couche du dessus le sera en partie par la couche du dessous.

11 1. Le document 3 rappelle la loi de Wien. L'application numérique confirme bien que :

$$\lambda_{\max} \times T = 2\,898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \Rightarrow$$

$$\lambda_{\max} = \frac{2\,898}{T} = \frac{2\,898}{5\,800} = 0,500 \mu\text{m} = 500 \text{ nm}.$$

2. a. Pour le mélange (ab), on constate (document 2) que L est susceptible de varier entre 260 et 440 nm. On calcule le rapport $\frac{2nL}{\lambda}$ (condition d'interférence constructive donnée dans le document 1) pour ces deux valeurs extrêmes : on obtient 1,56 et 2,64 ; ainsi $q = 2$. On obtient alors $L = 333 \text{ nm}$, soit 26 % ou 48 % pour la composition molaire en l'espèce a .

b. Pour le mélange ($a'b'$), on constate que L est susceptible de varier entre 320 et 460 nm. On calcule le rapport $\frac{2nL}{\lambda}$ pour ces deux valeurs extrêmes : on obtient 1,92 et 2,76 ; ainsi $q = 2$. On obtient alors $L = 333 \text{ nm}$, soit 43 % et 53 % pour la composition molaire en l'espèce a' .

3. Pour le mélange (ab), la condition d'interférence constructive suppose que $L(40^\circ\text{C}) = 333 \text{ nm}$, soit $L(37^\circ\text{C}) = L(40^\circ\text{C})/0,68 = 490 \text{ nm}$, ce qui n'est pas réalisable avec les données du document 2.

Pour le mélange ($a'b'$), la condition d'interférence constructive suppose que $L(40^\circ\text{C}) = 333 \text{ nm}$, soit $L(37^\circ\text{C}) = L(40^\circ\text{C})/0,74 = 450 \text{ nm}$, ce qui correspond à une proportion de 33 % en l'espèce a' .

4. Chaque cellule du thermomètre est constituée d'un mélange binaire de cristaux liquides cholestériques, à la composition chimique bien définie. Une cellule ne s'allume que pour une seule température, qui n'est jamais celle d'une autre cellule. Ce fonctionnement est possible parce que le pas du réseau, qui est la distance entre deux plans consécutifs de molécules cholestériques orientées dans la même direction, est fonction de la température et de la composition chimique de la cellule.

12 1. La synthèse additive consiste à superposer (par le biais de spots, par exemple) trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu) : le spectre du faisceau résultant s'obtient en additionnant les spectres de chaque spot et donne ici une impression de lumière blanche.

2. a. La réponse est donnée dans le document 3 et apparaît sur le spectre : $\lambda = 470 \text{ nm}$.

b. Comme l'énergie d'un photon $E = hf = \frac{hc}{\lambda}$ coïncide avec le produit Ue , il vient :

$$U = \frac{hc}{e\lambda} = 2,64 \text{ V}.$$

3. a. Le spectre des luminophores coïncide avec celui de la DEL blanche (document 3) duquel on soustrait le pic correspondant à la DEL au nitrure de gallium.

b. La lumière jaune émise par la couche de luminophores et la lumière bleue émise par la DEL s'additionnent pour donner de la lumière blanche, car ces deux couleurs sont complémentaires.

4. Quel que soit le choix de la technologie, la LED blanche nécessite une LED bleue que l'on ne sait fabriquer de manière industrielle que depuis les années 1995.

G. Sciences et société p. 153

Développement durable.

Le « risque métaux »

1. On pourra consulter par exemple : www.lenntech.fr/periodique/tableau-periodique.htm

Métaux : platine (Pt), lithium (Li), gallium (Ga).
Semi-conducteurs : germanium (Ge).

2. « Silicon valley » signifie « vallée du silicium ». Sous l'impulsion de prestigieuses universités de l'Est américain, des entre-

prises dont le secteur d'activité était celui des semi-conducteurs (le silicium Si est un semi-conducteur) ou de l'informatique se sont développées dans la vallée de Santa-Clara. Il ne faut pas naïvement croire que la région possède des conditions géologiques favorables à l'exploitation de quelques minerais permettant d'obtenir des semi-conducteurs. En particulier, il est précisé p. 126 du manuel que l'élément silicium représente 30 % de la masse de l'écorce terrestre (où il se trouve essentiellement sous forme de silice SiO_2).

Technologie. Un virus améliore l'efficacité des cellules solaires !

1. Lorsqu'une résistance R est connectée à un générateur de tension de f.é.m. U , elle est par-

courue par un courant d'intensité $I = U/R$. Un court-circuit peut être modélisé comme un fil placé entre les deux bornes d'un générateur : comme la résistance de ce fil est proche de zéro, il est parcouru par un courant de grande intensité que le générateur doit délivrer. Ce dernier est alors souvent détérioré.

2. La présence de virus dans les cellules solaires évite l'agglomération de nanotubes de carbone qui provoqueraient des courts-circuits dans certaines cellules. Les électrons engagés dans ces courts-circuits ne seraient pas collectés pour être utilisés hors de la cellule solaire, ce qui est le but d'une cellule, élément de base du panneau solaire.

H. Compléments pédagogiques

Les énoncés sont disponibles sur www.libtheque.fr/physiquechimie/lycee

► Corrigés des exercices

1 1. Les capteurs CCD (ou dispositif à couplage de charge) des appareils photo numériques ; les cônes et les bâtonnets de la rétine de l'œil.

2. La relation qui lie l'énergie d'un photon à sa fréquence est : $E = h\nu$, avec h la constante de Planck.

3. La détermination des longueurs d'onde des raies d'absorption du spectre de la lumière d'une étoile donne la composition chimique de sa photosphère.

4. Un détecteur supraconducteur de type thermique se trouve dans un état partiellement supraconducteur de la transition. En revanche, un détecteur à dissociation de paires se trouve dans un état supraconducteur.

2 1. $U_1 = R_1 I$ et $U_2 = R_2 I$.

2. a. $U_1 + U_2 = U$.

b. En faisant la somme des deux questions précédentes, il vient $U_1 + U_2 = (R_1 + R_2)I$.

Comme les tensions s'additionnent, il vient $U = (R_1 + R_2)I$, qui est bien de la forme $U = RI$ avec $R = R_1 + R_2$. Donc l'association des deux résistances se comporte, d'un point de vue électrique, comme une unique résistance.

c. L'application de la question précédente permet d'affirmer qu'on obtient un fil de résistance $2R$.

3. a. D'un point de vue dimensionnel, seules les expressions $R = \rho \frac{l}{S}$ et $R = \rho \frac{l^3}{S^2}$ sont recevables.

b. La réponse à la question 2. c montre que lorsqu'on double la longueur du fil, sa résistance double. Cela est en accord avec la relation $R = \rho \frac{l}{S}$, mais en désaccord avec la relation $R = \rho \frac{l^3}{S^2}$.

► Corrigé du sujet Bac

1. Le benzoate de cholestéryl présente une phase de cristal liquide car la molécule a un cœur rigide composé d'accolement de cycles et une chaîne latérale hydrocarbonée flexible.
2. Les deux réactifs donnent l'espèce **1** et deux molécules d'eau.
3. Le diol (**2a**) ne présente pas de phase de cristal liquide (une seule température de transition). Les deux autres diols présentent une phase de cristal liquide (deux températures de transitions).
4. Plus la chaîne hydrocarbonée est longue, plus la température de transition entre le cristal et la phase de cristal liquide est basse. Il est donc possible de modifier l'étendue en température de la phase cristal liquide en modifiant la longueur de la chaîne hydrocarbonée. Lorsque la chaîne hydrocarbonée du diol n'est pas assez longue (cas $n = 4$), celui-ci ne présente pas de phase de cristal liquide.

I. Bibliographie

- ✓ É. Guyon (sous la direction de), *Matière et matériaux. De quoi est fait le monde ?*, Belin-Pour la Science, 2010.
- ✓ S. Blundell, *La supraconductivité, 100 ans après*, Belin-Pour la Science, 2011.
- ✓ B. Sapoval et C. Hermann, *Physique des semi-conducteurs*, Ellipses, 1991.
- ✓ C. Ray et J.-C. Poizat, *La physique par les objets quotidiens*, Belin-Pour la Science, 2007. On consultera en particulier le chapitre « Les écrans à cristaux liquides » p. 90-99.
- ✓ www.supraconductivite.fr/fr/index.php#100ans-film

Chapitre 11

MATÉRIAUX : DES STRUCTURES PARTICULIÈRES

A. Le programme

Thème 3 : Matériaux

Domaine d'étude	Mots-clés
Structure et propriétés	Membranes • Colles et adhésifs • Tensioactifs • Émulsions • Mousses

✓ Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties

- Connaître et exploiter les conditions d'interférences constructives et destructives pour des ondes monochromatiques.
- Établir et exploiter les expressions du travail d'une force constante.
- Comparer les avantages et les inconvénients de deux protocoles (stratégie de la synthèse organique).
- Extraire et exploiter des informations pour montrer l'importance des interactions entre les molécules en milieu biologique.
- Utiliser la représentation topologique des molécules organiques.
- Extraire et exploiter des informations pour montrer l'importance du contrôle du pH dans un milieu biologique.

B. La démarche adoptée dans le manuel

Les mots clés « émulsion », « membrane », « mousse » et « tensioactif » sont naturellement reliés entre eux : les mousses, comme les émulsions, sont stabilisées par des molécules tensioactives ; les membranes cellulaires sont constituées de molécules tensioactives (les phospholipides). Ainsi, un lien entre biologie et chimie est explicité.

Les mots clés « colles » et « adhésifs » sont développés lors d'une activité expérimentale (p. 159 du manuel).

Comme dans le chapitre précédent, nous avons cherché à évacuer toute virtuosité mathématique, en faveur d'une plus grande compréhension des phénomènes physiques et chimiques par l'élève ; compréhension qui s'effectue à travers le plus grand nombre d'expériences. Les trois sujets Bac et l'activité documentaire constituent certainement un exemple de démarche d'enseignement et d'évaluation par compétences.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p. 154

✓ Réponses aux questions

- La cohésion des solides moléculaires est assurée par les forces de van der Waals (et par les liaisons hydrogène lorsque celles-ci existent dans le solide).
- Si le déphasage en un point M entre deux ondes sinusoïdales interférant est noté $\Delta\varphi$, k étant un entier alors :
 - lorsque $\Delta\varphi = 2k\pi$, les signaux sont en phase et interfèrent de façon constructive ;
 - lorsque $\Delta\varphi = 2k\pi + \pi$, les signaux sont en opposition de phase et interfèrent de façon destructive.
- Une molécule est polaire si à l'intérieur de la molécule, la répartition des charges est dissymétrique.

► S'interroger p. 154

Les domaines colorés sont dus aux interférences entre les deux faisceaux lumineux réfléchis par le film : le faisceau réfléchi au niveau de la première interface air-savon et celui réfléchi au niveau de la seconde interface savon-air. Le sujet Bac 12 p. 165 du manuel peut aider à l'interprétation du cliché.

D'une part, chaque couleur rend compte de l'épaisseur locale du film savonneux, d'autre part, la comparaison du cliché avec l'échelle des teintes de Newton (document 2 p. 165 du manuel) permet d'affirmer que les zones les moins épaisses de film (couleur noire, pourpre ou bleue) sont situées en haut, les plus épaisses (couleur jaune, rose ou verte) en bas : sous l'effet de la pesanteur, la solution de savon s'écoule vers le bas et le film s'amincit par le haut.

► Introduction p. 155

Une mousse est une dispersion de bulles de gaz dans un liquide. Les bulles occupent la majorité du volume. La phase liquide y est continue, contrairement à la phase gazeuse.

► Activité 1 p. 156

Cette activité ludique permet de réaliser une mousse et d'en apporter une définition claire. Elle offre, de plus, la possibilité de faire quelques révisions sur les réactions d'oxydoréduction (programme de 1^{re} S).

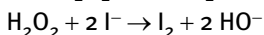
Matériel

- Bécher de 50 mL ; éprouvettes graduées de 250 mL et de 10 mL.
- Pipettes Pasteur ; grand cristalliseur.
- Spatule ; agitateur en verre ; papier pH.
- Longue bûchette de bois incandescente et allumettes (ou briquet).
- Gants de latex ; lunettes.
- Iodure de potassium ; eau tiède ; eau oxygénée à 130 volumes ; liquide vaisselle.

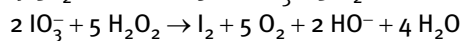
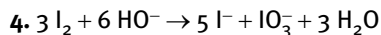
✓ Réponses aux questions

1. Le diiode I_2 est responsable de la coloration brune de la mousse et de l'odeur qui s'en dégage. Si l'on a ajouté de l'empois d'amidon, il prend une teinte bleu foncé caractéristique en présence de diiode.

2. Les couples oxydant/réducteur sont : H_2O_2/HO^- et I_2/I^- . L'équation de la réaction est :



3. La bûchette de bois incandescente permet de caractériser le dioxygène.



Et la décomposition de l'eau oxygénée : $2 H_2O_2 \rightarrow 2 H_2O + O_2$

5. La mousse est chaude car les réactions impliquées sont exothermiques.

6. La réaction met du temps à démarrer, puis s'accélère, puis décélère car les ions hydroxyde catalysent la réaction de décomposition de l'eau oxygénée. On parle alors de réaction autocatalytique. De plus, la température du milieu réactionnel augmente, ce qui a également tendance à accélérer la réaction.

7. Le liquide vaisselle, qui n'entre pas en jeu dans la réaction chimique, permet de stabiliser le système constitué des minuscules bulles de dioxygène produites par la réaction et dispersées dans l'eau. En effet, les molécules tensioactives du liquide vaisselle se placent aux interfaces gaz/liquide.

8. Le système formé correspond à la dispersion de bulles de dioxygène gazeux (produit par la réaction chimique) dans de l'eau liquide. Ces bulles sont nombreuses et dispersées dans la phase liquide : il s'agit donc bien d'une mousse d'après la définition donnée au début de cette activité.

► Activité 2 p. 157

Cette activité s'attache à déterminer la concentration micellaire critique (CMC) du dodécylsulfate de sodium (SDS) par conductimétrie. Dans un premier temps, les élèves doivent préparer des solutions par dissolution et par dilution. Dans un second temps, ils mesurent la conductivité de ces différentes solutions afin de déterminer la CMC du SDS par méthode graphique.

Matériel

- Six béchers de 100 mL ; cinq fioles jaugées de 100 mL ; pipette jaugée de 25 mL ; burette graduée de 25 mL ; bécher de 50 mL.
- Pipettes Pasteur ; spatule ; poire à pipetter.
- Bain thermostaté (si possible) ou thermomètre,
- Conductimètre ; balance précise au centième de grammes ; capsule de pesée.
- Dodécylsulfate de sodium ($NaC_{12}H_{25}SO_4$, $M = 288,372 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$), eau distillée.

✓ Réponses aux questions

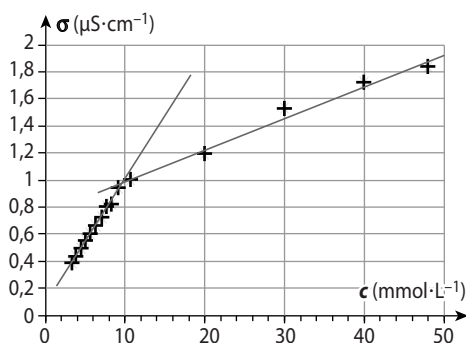
1. Les ions dodécylsulfate comportent une partie hydrophobe (chaîne de 12 atomes de carbone, la queue) et une partie hydrophile ($-SO_4^-$, la tête). Il s'agit donc bien d'ions amphiphiles, ou tensioactifs.

2. Il n'est pas nécessaire d'étalonner le conductimètre, puisque seule la variation de conductivité est utile à la détermination de la CMC.

3. Le tableau suivant donne les concentrations des solutions après les différents ajouts d'eau à la solution de concentration initiale $c_5 = 1,0 \cdot 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$:

Volume d'eau ajouté (mL)	2,5	5,0	7,5	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0
Concentration ($10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	9,1	8,3	7,7	7,1	6,3	5,6	5,0	4,5	3,8	3,3

Le graphique représentant la conductivité en fonction de la concentration des différentes solutions présente deux segments de droite de pentes différentes.



4. La formation de micelles n'est possible qu'à partir d'une certaine concentration en SDS. Avant la CMC, les ions dodécylsulfate et les ions sodium sont libres en solution ; la conductivité augmente donc proportionnellement à leur concentration (loi de Kohlrausch). À partir de la CMC, des micelles se forment et les ions ne sont plus disponibles pour conduire le courant ; la conductivité a donc tendance à rester constante (les micelles anioniques sont volumineuses et conduisent donc très mal le courant, et les ions sodium restent à proximité des micelles formées, ils ne sont donc plus disponibles pour conduire le courant). La CMC correspond donc à l'abscisse du point d'intersection des deux segments de droite obtenus lors du tracé de la conductivité en fonction de la concentration des différentes solutions. Une expérience réalisée dans un bain thermostaté à 25 °C a donné une CMC égale à $9,7 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, ce qui est en accord avec la littérature qui donne une CMC pour le SDS comprise entre 7 et 10 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ à 25 °C. L'incertitude sur cette valeur vient de l'incertitude sur les concentrations des solutions préparées et essentiellement du tracé des deux segments de droite sur le graphique représentant la conductivité en fonction de la concentration des différentes solutions.

5. Les micelles se forment pour stabiliser la solution obtenue : les chaînes hydrogénocarbonées hydrophobes tendent à se regrouper pour limiter leurs interactions avec le solvant (eau) et les têtes ioniques hydrophiles maximisent leurs interactions stabilisantes avec l'eau.

► Activité 3 p. 158

Le but de cette activité est de réinvestir des connaissances de l'enseignement spécifique afin d'exploiter des informations au préalable extraites du document proposé.

Compétence : extraire et exploiter des informations pour montrer l'importance des interactions entre les molécules en milieu biologique.

✓ Réponses aux questions

1. Les parties hydrophobes se font face pour supprimer tout contact entre elles et l'eau. Les têtes hydrophiles ont une forte affinité avec l'eau car elles sont polaires (avec une répartition asymétrique des charges).

Complément : on peut examiner les interactions intermoléculaires qui se développent entre les molécules. Il s'agit des interactions de van der Waals et des liaisons hydrogène. Les longues chaînes carbonées sont maintenues face à face grâce à des interactions de type van der Waals. Par ailleurs, il y a également des interactions attractives entre les ions de la tête hydrophile et le dipôle eau (liaison hydrogène + van der Waals).

2. L'énergie provient de la scission de l'ATP en ADP + phosphate inorganique.

3. La concentration en ions potassium K^+ est plus élevée à l'intérieur de la cellule qu'à l'extérieur. L'inverse est vrai pour les ions sodium Na^+ . Ces gradients de concentrations devraient respectivement entraîner un déplacement spontané des ions K^+ vers l'extérieur de la cellule et un déplacement spontané des ions Na^+ vers l'intérieur de la cellule.

4. Pour chaque cycle de la pompe, trois ions Na^+ sont expulsés du milieu intracellulaire et remplacés par deux ions K^+ provenant du milieu extracellulaire.

5. Lorsque la cellule est au repos, la concentration en ions K^+ est plus élevée à l'intérieur de la cellule qu'à l'extérieur. L'inverse est vrai pour les ions sodium Na^+ . Il y a une dissymétrie des charges de part et d'autre de la membrane : il y a donc une différence de potentiel transmembranaire, appelée (abus de langage) potentiel de membrane.

6. La membrane cellulaire a une structure sphérique en bicouche. Les molécules amphiphiles (les phospholipides) s'auto-assemblent de telle sorte que leurs parties hydrophobes se font face et que leurs parties hydrophiles sont en contact avec un milieu aqueux. Cette bicouche présente des canaux qui permettent d'échanger, sans coût énergétique, des ions entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule. Ces échanges sont pilotés par des gradients de concentration. Cependant, certaines cellules disposent d'une pompe ionique permettant de réaliser un transport actif d'ions et d'entretenir l'inégalité de répartition des ions K^+ et Na^+ de part et d'autre de la membrane.

7. Avec le transport actif, les cellules peuvent prélever dans leur environnement des substances rares, mais essentielles à leur fonctionnement, ou à l'inverse, se débarrasser de déchets toxiques, même dans un environnement extrêmement pollué. Le transport actif constitue un gain en potentiel de survie pour la cellule.

► Activité 4 p. 159

Dans cette activité, on se propose d'identifier les conditions expérimentales optimales pour préparer de la colle à la caséine. La caséine, principale protéine du lait, est extraite du lait.

Matériel

- Bécher de 250 mL ; deux pots en verre.
- Bain-marie.
- Agitateur en verre ; verre de montre ; pipettes Pasteur ; papier pH.
- Dispositif de filtration Büchner ; deux morceaux de papier-filtre ; gaze.
- Balance ; capsule de pesée.
- Pinceau, brosse et quatre morceaux de carton rigide.
- Lait demi-écrémé ; eau très froide ; eau distillée.
- Solution d'acide éthanoïque à 10 % en volume.
- Caséine en poudre fine.
- Hydroxyde de calcium ; carbonate de sodium.

✓ Réponses aux questions

1. Le lait caille. La caséine précipite.
2. Le lavage du solide à l'eau glacée élimine les traces d'acide acétique retenu par celui-ci sans dissoudre la caséine. L'acide acétique étant soluble dans l'eau, l'eau doit être glacée pour éviter de dissoudre du solide : en effet, la solubilité est en général plus faible à basse température.
3. La prise de la colle peut être un phénomène purement physique, comme l'évaporation d'un solvant, ou un phénomène chimique impliquant la formation de liaisons covalentes ou ioniques lors de réactions chimiques, à l'interface entre la colle et le matériau.
La colle à la caséine est à prise physique ; la colle sèche et le solvant (eau) s'évapore.
4. La colle est plus grumeleuse avec la caséine extraite qu'avec la caséine en poudre fine.
5. La colle sèche plus rapidement avec la caséine en poudre.
6. Pour la colle à la caséine extraite, la rupture se fait au contact d'un des deux cartons. Pour la colle à la caséine en poudre fine, la rupture se fait à l'intérieur d'un des deux cartons.
7. Le contrôle du pH est important, puisque la caséine précipite lorsqu'il est fortement abaissé : cela permet l'extraction de la caséine. L'émulsion que constitue le lait est déstabilisée dans ce cas.
Le contrôle de la température est également important lors du lavage, car il permet d'éviter les pertes de solide par dissolution.
8. Dans un bon collage, la rupture ne se fait pas dans l'épaisseur de la colle ou au contact d'un des deux objets, mais à l'intérieur d'un des deux objets. On a un meilleur collage avec la caséine en poudre fine. Exemples d'explications possibles :
 - dans le cas de la colle à la caséine en poudre fine, les interactions attractives entre les deux objets à coller sont bien réparties en surface, contrairement à la colle à la caséine extraite ;
 - la caséine extraite contient des graisses qui n'ont pas été éliminées par le lavage à l'eau.

D. Déroulement du cours

La totalité du chapitre peut être traitée en 8 heures. Cependant, tous les mots clés peuvent ne pas être abordés par l'enseignant (ce qui diminue la durée du temps investi sur le chapitre).

Séance de TP

- Activités 1, 2 et 4 (4 h).

Séance d'activité documentaire

- Activité 3 (1 h).

Exercices et sujet de Bac au choix : 1 h + 1 h.

Bilan du chapitre sous la forme d'un essentiel : 1 h.

E. Réponses aux exercices p. 162-163

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 208.

5 1. Le lait est un mélange homogène à l'échelle macroscopique. Au microscope, on doit pouvoir observer des globules de gras dispersés

dans l'eau du lait : le lait est une émulsion d'huile dans de l'eau. Cette observation ne présente aucune contradiction : les échelles sont différentes.

2. Le lactose est soluble dans l'eau car les groupements hydroxyles de la molécule établissent des liaisons hydrogène avec l'eau. Les sels minéraux sont solubles dans l'eau car se sont des solides ioniques.

3. Les lipides ne sont pas solubles dans l'eau car ils sont constitués de longues chaînes hydrocarbonées apolaires et hydrophobes : les interactions de van der Waals sont très faibles, voire nulles.

4. L'acide lactique est responsable de l'acidité du lait.

6 1. Une mousse laitière est une dispersion de bulles de gaz dans une phase continue émulsionnée, le lait.

2. Les deux voies de stabilisation des mousses laitières sont : la stabilisation de l'interface gaz/liquide ; l'augmentation de la viscosité de la phase continue.

3. La demande du marché en produits allégés ne facilite pas la tâche du fabricant de mousses. En effet, celui-ci doit trouver des molécules capables de se substituer aux globules gras pour stabiliser les interfaces des bulles de gaz.

4. L'azote diffuse moins bien que l'air dans la structure : l'air contient du diazote (environ 80 %) et du dioxygène (20 %). L'air diffuse probablement mieux que le diazote pur, car il contient du dioxygène et stabilise moins bien la mousse.

5. L'air stabilise l'émulsion et est moins coûteux que les fruits, le lait et le sucre ! La technique répond à la demande en produits allégés et, de plus, elle est rentable. Les prix des produits allégés sont supérieurs à ceux des produits non allégés, et pourtant ils demandent moins de matières premières.

7

Phase dispersée	Milieu de dispersion	Nom du système	Exemple
Gaz	Liquide	Mousse	Bain moussant, mousse de bière
	Solide	Mousse	Meringue

Liquide	Gaz	Aérosol	Spray de parfumerie
	Liquide	Émulsion	Lait, mayonnaise
Solide	Gaz	Fumée	Fumées industrielles
	Liquide	Suspension	Argiles, boues, peintures

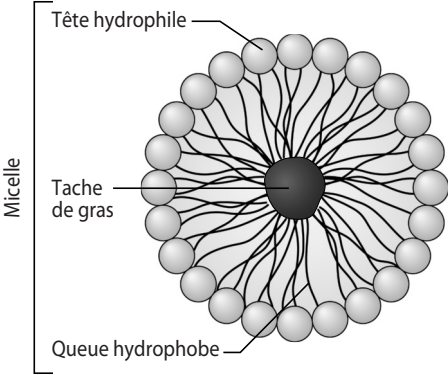
8 1. L'oléate de sodium possède une longue chaîne hydrocarbonée apolaire et une tête anionique polaire. La chaîne est hydrophobe et la tête est hydrophile. Il y a donc deux parties dont les comportements sont opposés.

2. Les ions du savon sont amphiphiles. Les chaînes hydrocarbonées interagissent entre elles en établissant des liaisons de type van der Waals.

Les têtes polaires interagissent avec les molécules d'eau.

L'interaction est de type ion-dipôle.

3.



4. Les micelles sont chargées négativement en surface et se repoussent car elles sont de même charge. Par ailleurs, les molécules d'eau ont une forte affinité avec les cations Na^+ : l'eau va stabiliser les micelles et les « emporter ».

9 1. $F' = 2\gamma L$, donc $\gamma = 30 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ (attention, il y a deux interfaces air/liquide).

2. Commençons par remarquer que $F = -F'$. Par ailleurs, $W = F\Delta a = -3,6 \cdot 10^{-5} \text{ J}$. $W < 0$ car la force de tension superficielle est résistante.

10 1. Compte tenu de la définition proposée dans l'énoncé, l'unité de γ est le $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ (mais on trouve aussi le $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$).

$$2. P_A - P_{\text{ext}} = \frac{4\gamma_{\text{air/liquide}}}{R_A}$$

$$\text{et } P_B - P_{\text{ext}} = \frac{4\gamma_{\text{air/liquide}}}{R_B}.$$

Par ailleurs $R_A > R_B$, il vient donc : $P_A < P_B$.

3. L'énoncé indique que l'air s'écoule des zones de haute pression vers les zones de basse pression : comme $P_A < P_B$, il s'ensuit que

l'air contenu dans la petite bulle s'engouffre dans la grosse bulle, qui grossit donc : la bulle A grossit. Compte tenu de la loi de Laplace, la pression de l'air dans la bulle A diminue. Le même raisonnement conduit aux résultats suivants : le rayon de la bulle B diminue ; la pression de l'air qu'elle contient augmente.

4. Compte tenu de la réponse précédente, l'air s'écoule de la petite bulle vers la grosse bulle, qui continue de grossir jusqu'à disparition de la petite bulle. Cette expérience a été filmée.

E. Réponses aux sujets BAC p. 164-166

11 1. a. La lécithine possède une tête polaire hydrosoluble et une queue apolaire liposoluble constituée de deux chaînes hydrocarbonées.

b. La lécithine et les sels biliars possèdent un groupe hydrophobe et un groupe hydrophile. Ce sont donc des tensioactifs qui placent leur groupe hydrophile au contact de l'eau et leur groupe hydrophobe au contact des molécules de graisses pour former des micelles. Ces micelles évitent la coalescence des gouttes formées de molécules lipidiques apolaires et permettent le transport au sein du milieu aqueux intestinal de ces molécules, insolubles dans l'eau.

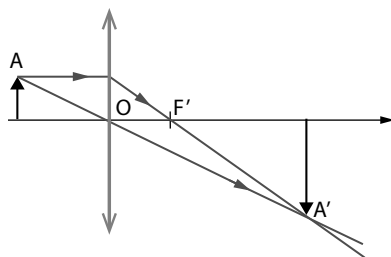
2. a. La composition de la bile au point Q est : 50 % de lécithine, 20 % de cholestérol et 30 % de sels biliars.

b. Au point Q, la bile est un milieu diphasique : solution micellaire + cristaux de cholestérol.

3. Pour être digeste, l'émulsion « eau, graisse et cholestérol » doit être stabilisée par des molécules tensioactives telles que le glycocholate et la lécithine qui entrent dans la composition de la bile. Seuls les mélanges dont la composition se situe dans la petite zone inférieure gauche du triangle de Small et Dervichian sont homogènes, et permettent de maintenir le cholestérol et la graisse bien dispersés en solution. Cependant, une petite

variation de la quantité de cholestérol dans la bile peut conduire à l'apparition d'un mélange hétérogène et à la précipitation du cholestérol. On parle alors de formation de calculs biliars.

12 1. a.



b. On utilise la relation de conjugaison de Descartes :

$$\frac{1}{OA'} - \frac{1}{OA} = \frac{1}{f'} \Rightarrow \overline{OA'} = \frac{1}{\frac{1}{10} - \frac{1}{15}} = 30 \text{ cm}.$$

L'écran est placé à 30 cm de la lentille pour qu'une image nette soit observée sur celui-ci.

c. La dimension de l'image est $48 \text{ mm} \times 72 \text{ mm}$.

2. Le film est le plus épais là où la différence de marche optique est la plus élevée. Compte tenu de l'échelle des teintes de Newton (document 2), le film savonneux du document 1 est plus épais en haut de la photographie (couleurs bleues et vertes) qu'en bas (couleurs blanches et jaunes). En effet, comme le grandissement est négatif, le haut de la diaposi-

tive apparaît en bas de la photographie et réciproquement : le film savonneux, drainé sous l'action de la gravité, s'amincit par le haut.

3. a. L'épaisseur maximale de la vitre devrait être de $e_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{2n} = \frac{4\,000}{2 \times 1,5} \approx 1,3\,\mu\text{m}$. Les

domaines colorés n'existent que si l'épaisseur de la vitre est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde incidente.

b. On n'observe pas d'interférences en lumière blanche sur des films d'huile ou d'hydrocarbure sur l'eau si le film est trop épais : d'épaisseur typiquement supérieure au micromètre.

13 Erratum : sur le document 1, le dernier niveau de la molécule émettrice doit être de même énergie que l'avant-dernier niveau de la molécule excitatrice.

1. Le photon de désexcitation a une longueur d'onde plus élevée que celle du photon d'excitation, et donc une énergie plus faible que ce dernier.

2. On observe une émission de photons de fluorescence, d'énergie égale à l'énergie de désexcitation de la molécule de marquage.

3. a. Il faut que l'écart énergétique entre les deux niveaux de désexcitation de la molécule excitatrice soit le même que l'écart énergétique correspondant à la transition mise en œuvre lors de l'excitation de la molécule émettrice (voir le schéma). Cela correspond à un phénomène de résonance.

b. Les marqueurs doivent être deux molécules respectant la condition énoncée ci-dessus.

4. a. On ne recueillera que des photons de fluorescence de longueur d'onde 550 nm. Seul le premier marqueur fluorescent sera excité. Le deuxième ne sera pratiquement pas excité, car aucun transfert d'énergie par transition non radiative n'est possible.

b. S'il y a fusion, le transfert non radiatif est possible entre les deux marqueurs, car les molécules correspondantes sont alors très proches au sein de la vésicule issue de la fusion des deux liposomes. En excitant à 460 nm, on observera l'apparition d'une émission de fluorescence du deuxième marqueur à 580 nm, rendue possible par ce transfert, et parallèlement une diminution de l'émission à 550 nm.

F. Science et société p. 167

Technologie. Une mousse qui dure, dure... et s'effondre à volonté !

1. Selon l'article de M. Vignes-Adler et F. Granger, « La vie éphémère des mousses », *Pour la Science*, n° 293, mars 2002 :

La vie d'une mousse liquide est éphémère. Aussitôt après sa formation, trois mécanismes mènent à sa disparition, classés par ordre décroissant de durée :

– le mûrissement, lié à la pression du gaz, qui dure d'une minute à plusieurs heures (les parois d'une bulle de savon ne sont pas étanches. Le gaz se dissout lentement dans

les parois, puis diffuse jusqu'aux bulles voisines. La quantité de gaz contenu dans une bulle varie progressivement : c'est le « mûrissement » de la mousse.) ;

– le drainage, lié au liquide [sous l'action de la gravité], qui intervient à l'échelle de la minute ;

– la rupture des films, phénomène presque instantané en l'absence de molécules stabilisatrices (les tensioactifs).

2. Il s'agit bien de chimie verte, car l'acide gras 12-hydrostéarique est issu d'une biomolécule non réputée néfaste pour l'environnement.

G. Compléments pédagogiques

Les énoncés sont disponibles sur www.libtheque.fr/physiquechimie

► Corrigés des exercices

1 1. Un chewing-gum colle sur une moquette du fait des interactions de van der Waals qui s'établissent entre celui-ci et le support.

2. L'adhésion est d'autant plus importante que la surface de contact entre les deux matériaux est importante (bonne mouillabilité). La surface de contact entre le chewing-gum et la moquette est d'autant plus importante que la température est élevée. Le chewing-gum colle donc davantage à haute température.

3. Pour décoller le chewing-gum, on peut donc le frotter avec un glaçon de façon à le faire durcir et ainsi diminuer les interactions avec la moquette ; il est alors aisé de le décoller à l'aide d'un couteau.

2 1. Le dioxygène de l'air joue le rôle de comburant (programme de 2^e).

2. L'eau liquide ne permet pas un effet d'étouffement du feu, car elle est plus dense que les liquides inflammables et ne permet donc pas de stopper l'apport en dioxygène.

3. Il faut rendre l'eau moins dense que le combustible, pour qu'elle surnage au-dessus du combustible et permette d'étouffer le feu. Pour cela, on peut proposer de former une mousse liquide. Celle-ci crée une barrière entre le combustible et le comburant (dioxygène) qui permet d'étouffer le feu jusqu'à son extinction.

4. On obtient une mousse liquide en ajoutant à l'eau de l'air et un émulseur. On rappelle qu'une mousse est une dispersion de bulles de gaz dans un liquide ; l'émulseur permet de stabiliser la mousse.

3 1. Les sulfonates de calcium et de magnésium sont plus solubles dans l'eau que les carboxylates de calcium et de magnésium.

2. Les deux composés ont la même formule brute : $C_{18}H_{29}SO_3^-$, Na^+ . Ils sont isomères l'un de l'autre. Ils diffèrent seulement par leur chaîne hydrocarbonée. Ce sont des isomères de chaîne.

3. Le *para*-dodécylbenzène sulfonate de sodium est un composé à chaîne hydrocarbonée linéaire et non ramifiée. Il peut donc être utilisé pour fabriquer un détergent biodégradable, contrairement à l'alkylbenzènesulfonate de sodium.

► Corrigé de l'activité supplémentaire

Ce qui doit être observé :

- la forme des bulles d'air, leur taille et leur disposition ;
- le film séparant des bulles voisines et les angles de raccordement entre les bulles ;
- les bulles ayant moins de 6 faces, les bulles ayant plus de 6 faces et les bulles à 6 faces exactement.

Les bulles ayant moins de 6 faces se vident dans les bulles ayant plus de six faces (si $n < 6$ alors $\frac{da_n}{dt} < 0$; si $n > 6$, alors $\frac{da_n}{dt} > 0$).

Les bulles ayant 6 côtés sont stables (si $n = 6$, alors $\frac{da_n}{dt} = 0$).

Exemple de protocole

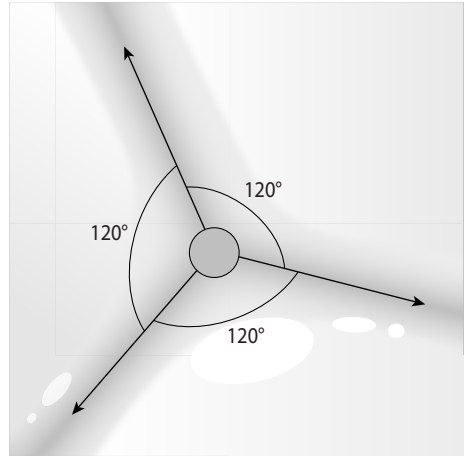
- Diluer un peu de savon liquide dans le cristalliseur rempli d'eau jusqu'à quelques millimètres du bord.
- Placer le boîtier CD fermé verticalement en plongeant la bordure dans l'eau savonneuse. L'ouverture laissée par l'absence du support du CD doit se trouver sous le niveau du liquide.

- Immerger une extrémité de la paille au centre de l'ouverture.
- Souffler de l'air à l'autre extrémité.
- Prendre des photos de la mousse à des instants différents.

La façon de souffler (doux et régulièrement ou fort) détermine la morphologie de la mousse formée. En effet, plus on souffle fort, plus les bulles sont grosses et polydisperses. Plus on souffle doucement et régulièrement, plus les bulles sont monodisperses et ordonnées.

Sur une mousse polydisperse, on peut observer la courbure des films séparant des bulles voisines. Les angles de raccordement sont de 120° (voir figure ci-contre).

On peut voir aussi les bulles ayant moins de six faces se vider dans les bulles ayant plus de six faces, ce qui valide en partie la loi de von Neumann.



H. Bibliographie

- ✓ É. Guyon (sous la direction de), *Matière et matériaux. De quoi est fait le monde ?*, Belin- Pour la Science, 2010. On consultera en particulier les paragraphes p. 114-120 ; 248-261 ; 264-268 et 275-278.
- ✓ Isabelle Cantat et al., *Les mousses : structure et dynamique*, Belin, collection « Échelles », 2010.
- ✓ P.-G. de Gennes, F. Brochard-Wyart et D. Quéré, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, collection « Échelles », nouvelle édition 2005.
- ✓ J. Charvolin, *Architectures de la matière molle : des films de savons aux membranes biologiques*, Belin, collection « Échelles », 2008.
- ✓ M. Mitov, *Matière sensible. Mousses, gels, cristaux liquides et autres miracles*, Le Seuil, collection « Science ouverte », 2010.
- ✓ A. Brack et B. Leclercq, *La vie est-elle universelle ?*, EDP Sciences, 2003.
- ✓ Animation en français illustrant le fonctionnement d'une pompe sodium-potassium (voir Activité documentaire p. 128) : www.biomultimedia.net/archiv/pompe/pomp2.htm
- ✓ Animation illustrant l'action des micelles dans un détergent : <http://chimie.scola.ac-paris.fr/flash/micelles.htm>
- ✓ Lien vers une vidéo présentant l'observation, en lumière blanche ou monochromatique, de la figure d'interférences obtenue sur une lame mince de savon d'épaisseur variable : <http://coursouverts.ujf-grenoble.fr/joomla/index.php/component/content/article/56-optique2/97-savon>

Chapitre 12

LES NOUVEAUX MATÉRIAUX

A. Le programme

Thème 3 : Matériaux

Domaine d'étude	Mots-clés
Nouveaux matériaux	• Nanotubes • Nanoparticules • Matériaux nanostructurés • Matériaux composites • Céramiques • Verres • Matériaux biocompatibles • Textiles innovants

✓ Compétences de l'enseignement spécifique réinvesties

- Extraire et exploiter des informations sur l'absorption de rayonnements par l'atmosphère terrestre et ses conséquences sur l'observation des sources de rayonnements dans l'Univers.
- Extraire et exploiter des informations sur la catalyse, notamment en milieu biologique et dans le domaine industriel, pour en dégager l'intérêt.
- Reconnaître des espèces chirales à partir de leur représentation.
- Utiliser la représentation de Cram.
- Identifier les atomes de carbone asymétriques d'une molécule donnée.
- Reconnaître les groupes caractéristiques dans les alcools, aldéhydes, cétones, acides carboxyliques, esters, amines, amides.
- Identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base connaissant le pH du milieu et le pK_A du couple.
- Extraire et exploiter des informations pour montrer l'importance du contrôle du pH dans un milieu biologique.
- Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.

B. La démarche adoptée dans le manuel

Les activités proposées (deux activités documentaires et une activité expérimentale) permettent de traiter l'essentiel des mots-clés associés à ce chapitre en les regroupant autour de trois thèmes : les matériaux mis en œuvre dans les écrans tactiles, les matériaux utilisés en médecine et les surfaces aux propriétés de mouillage particulières. Les activités et les exercices seront l'occasion de réinvestir des connaissances de 1^{re} S et de l'enseignement spécifique de T^{erm} S.

C. Commentaires sur les activités et documents proposés

► Vérifier ses acquis p. 168

✓ Réponses aux questions

- Un solide ionique cristallin est composé de cations et d'anions disposés de façon ordonnée.
- Un cristal ionique est électriquement neutre.
- Sa cohésion est assurée par l'ensemble des forces électrostatiques, attractives et répulsives, entre les ions du cristal.
- Un polymère est un matériau constitué de macromolécules. Une macromolécule est composée de la répétition d'un ou de plusieurs groupes d'atomes, appelés « motif ».

► S'interroger p. 168

✓ Réponses aux questions

L'activité 3 révélera que l'étalement d'une goutte sur une surface dépend de l'état de cette surface (voir le doc. 5 page 172 du manuel). En particulier, lorsque la structure présente des enclaves d'air à l'échelle microscopique (voir doc. 8 page 173 du manuel), la surface devient très hydrophobe : le mouillage est très faible, c'est-à-dire que la goutte ne peut s'étaler et prend la forme d'une sphère. On appelle souvent ce phénomène « effet Lotus », puisqu'il est observé à la surface des feuilles de lotus.

► Introduction p. 169

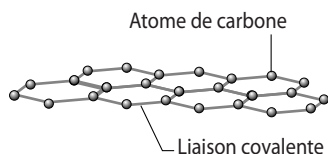
L'activité 1 met en évidence quelques propriétés remarquables des nanotubes de carbone : ce sont d'excellents conducteurs électriques et ils peuvent être par ailleurs transparents ; ils servent, par exemple, à fabriquer des écrans souples et tactiles. Une recherche sur Internet serait l'occasion de mettre en évidence bien d'autres propriétés prometteuses.

► Activité 1 p. 170

Cette activité documentaire, construite autour d'un texte paru dans la revue *Courrier International*, présente le fonctionnement des écrans tactiles et les matériaux utilisés pour les fabriquer. Elle permet d'introduire trois mots-clés : nanoparticule, nanotube et matériaux nanostructurés.

✓ Réponses aux questions

1. Oxyde d'indium : In_2O_3 (électriquement neutre). La cohésion est assurée par des interactions électrostatiques.
2. Propriétés utiles de l'ITO : conduction électrique et transparence.
3. Consommation jusqu'à épuisement des stocks : 1 600 tonnes par an en moyenne.
4. a.



- b. L'épaisseur d'une feuille de graphène est de l'ordre de grandeur de la taille d'un atome de carbone, soit environ $1 \text{ \AA}$ (10^{-10} m).
- c. Trois électrons de valence sont impliqués dans des liaisons covalentes au sein du graphène (chaque atome de carbone est lié à trois autres atomes de carbone). Comme la valence d'un atome de carbone est de quatre, il reste un électron disponible (délocalisé) pour assurer la conduction.
5. Sous forme de matériau nanostructuré, le carbone est transparent à la lumière visible.
6. Intérêt des nanomatériaux flexibles : fabriquer des écrans souples. Par exemple, Samsung prévoit la production industrielle d'écrans souples d'ici 2013. On pourra trouver quelques informations à l'adresse suivante :
www.futura-sciences.com/fr/news/t/technologie-1/d/des-ecrans-souples-en-2012-chez-samsung-et-des-mobiles-mous-chez-nokia_34356/
7. Les principales caractéristiques des matériaux utilisés pour réaliser des écrans tactiles sont : la transparence, la conduction de l'électricité et, si possible, la flexibilité.

► Activité 2 p. 171

Cette activité documentaire, construite autour de deux extraits de *CNRS Le journal*, présente des matériaux utilisés en médecine. Elle permet d'introduire deux mots-clés : céramique et matériaux biocompatibles.

✓ Réponses aux questions

- Le tissu osseux est constitué d'une partie organique (cellules, protéines, fibres collagènes) et d'une partie minérale, qui représente environ un tiers de la masse de l'os. La partie minérale est essentiellement composée d'hydroxyapatite ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$), ainsi que de petites quantités de fer, de fluor et d'oligo-éléments minéraux.
- L'utilisation des céramiques fait qu'il n'est pas nécessaire de prélever de l'os à un autre endroit du squelette pour réaliser une greffe. La structure et la composition des céramiques sont plus proches de celles de l'os que celles d'un implant métallique.
- La composition chimique et la structure du biomatériau doivent être voisines de celle de l'os.
- Le ligament synthétique est reconnu par l'organisme comme un corps étranger : combattu par les globules blancs, il déclenche donc une réponse inflammatoire.
- La force de rupture du tendon d'Achille (4 000 N selon le texte) vaut cinq fois le poids d'un individu de 80 kg (800 N en considérant $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).
- Le biomatériau remplaçant un ligament naturel doit posséder des propriétés mécaniques voisines de ce dernier. Il doit, par ailleurs, être biocompatible.
- Les biomatériaux sont des matériaux artificiels destinés à réparer certaines fonctions du vivant qui sont endommagées. Ils doivent répondre à plusieurs contraintes :
 - la biocompatibilité : le matériau ne doit pas déclencher de rejet de la part de l'organisme ;
 - la reproduction de la fonction biologique : un tendon d'Achille artificiel doit être aussi résistant et souple que celui qu'il remplace ;
 - un caractère pérenne : si la céramique qui vient combler une dent endommagée par une carie se remplace aisément, il en va tout autrement d'un os artificiel ou d'une valve cardiaque...

► **Activité 3** p. 172-173

Cette activité expérimentale permet de mettre en évidence les propriétés de mouillage de l'eau. Elle présente ensuite deux applications, autour de deux mots-clés : textile innovant et verre.

Matériel nécessaire

- 2 lames de verre, lame de téflon ;
- compte-gouttes ;
- poudre de lycopode ;
- éthanol, eau distillée.

✓ **Réponses aux questions**

1. Les lames sont nettoyées à l'éthanol avant l'expérience afin d'enlever tout dépôt en surface (en particulier organique ou graisseux).
2. a. La forme des gouttes dépend du support sur lequel on les dépose.
b. L'eau s'étale le plus sur la surface de verre nue (mouillage plus important). Elle reste de forme plus ou moins sphérique sur le téflon ou sur la poudre de lycopode.
3. Du sable est projeté à grande pression sur le métal de la poêle, porté à haute température afin de créer des rugosités (une telle opération est appelée « sablage » ; elle est aussi mise en œuvre sur des surfaces peintes afin d'en dégager la peinture). Le Téflon est ensuite pulvérisé sous forme d'un apprêt (dont la composition est gardée secrète), de sorte qu'il s'introduise dans les interstices créés par le sable. L'ensemble est alors cuit. En refroidissant, les interstices se resserrent, emprisonnant la mince couche de Téflon. Ensuite, une seconde, puis une troisième couche de Téflon sont appliquées (chacune adhère à la couche de Téflon précédente).
4. La couche extérieure de la membrane Gore-Tex se comporte comme la lame de Téflon étudiée dans la partie A, empêchant l'eau de s'étaler et donc de traverser le tissu.
5. a. Les trous du tissu Gore-Tex sont beaucoup plus petits que les gouttes d'eau. Une goutte a un diamètre de l'ordre de 1 mm, alors que les trous du tissu font environ $0,2\text{ }\mu\text{m}$.
b. Compte tenu de la question précédente, les gouttes d'eau ne peuvent traverser les trous du tissu Gore-Tex.
c. Les pores permettent d'évacuer vers l'extérieur la vapeur d'eau issue de la transpiration, tout en bloquant le passage des gouttes d'eau liquide en sens inverse.
6. Le textile est respirant, tout en étant imperméable à l'eau des précipitations, des projections liées aux vagues dans le cadre d'une utilisation en sport nautique, etc.
7. La structure microstructurée du verre empêche d'étalement de l'eau à la surface, à l'instar de la couche de pollen de lycopode.
8. L'utilisation de tels verres permet, par exemple, d'éviter la formation d'un film d'eau sur la surface du pare-brise : la visibilité du conducteur n'est donc pas modifiée.
9. En modifiant l'état de surface des matériaux, il est possible de leur conférer des propriétés de surface particulières, par exemple vis-à-vis du mouillage. Par exemple, on réalise :
 - des verres superhydrophobes, sur lesquels l'eau ne mouille pas. Si la surface est inclinée, la goutte, alors de forme sphérique, roule en emportant les salissures : ces surfaces sont autonettoyantes.
 - des textiles innovants : les vêtements Gore-Tex sont munis d'une couche extérieure hydrophobe qui confère des propriétés déperlantes au vêtement, mais qui, grâce à des microtrous, autorise le passage de la vapeur, issue de la transpiration, de l'intérieur vers l'extérieur du vêtement. En ce sens, ces textiles sont dissymétriques vis-à-vis des transferts d'eau.

D. Déroulement du cours

On peut compter deux séances pour ce chapitre : une première séance pour réaliser les activités (documentaires et expérimentale) ; une seconde séance consacrée au traitement d'exercices et à la résolution des sujets Bac proposés autour des mots-clés du chapitre.

E. Réponses aux exercices p. 176-178

Les réponses aux exercices qui ne figurent pas ici sont à la fin du manuel, p. 208.

6 1. a. L'interaction électrostatique est responsable de la cohésion du cristal ionique.

b. La formule de l'ion titane est Ti^{4+} (en effet, TiO_2 est électriquement neutre).

2. Lorsqu'il pleut, l'eau s'étale donc en un film, entraînant les poussières.

3. a. Un oxydant est une espèce chimique susceptible de gagner un ou plusieurs électrons.

b. Les composés organiques sont détruits par oxydation.

c. Un catalyseur est une espèce chimique qui augmente la vitesse de réaction sans intervenir dans l'équation de la réaction. Il est consommé et régénéré au cours de la réaction.

d. La durée de vie du revêtement de TiO_2 est *a priori* longue car il n'est pas consommé par la réaction qu'il catalyse.

e. Il s'agit d'une catalyse hétérogène, puisque le catalyseur est à l'état solide, tandis que les réactifs sont à l'état gazeux.

4. Le dioxyde de titane possède deux rôles dans la réalisation des vitrages autonettoyants :

– élimination des poussières (substance hydrophile) ;

– lutte contre les dépôts organiques en surface (catalyseur).

7 1. Les forces de frottement exercées par la peau sur le textile permettent de contrôler la libération du produit.

2. La durée de vie est limitée, puisque le produit finit par s'épuiser. Cependant, cette durée de vie est plus longue lorsque le produit est micro-encapsulé (le relargage est alors

progressif) que lorsqu'il est directement posé sur les fibres.

3. a. On peut songer aux paramètres suivants : pH, température, degré d'humidité, etc.

b. On peut imaginer une grande variété de textiles : textile dont les propriétés changent en fonction de la température pour assurer une protection vis-à-vis du froid, textile ignifugé pour les pompiers, etc.

8 1. Les groupes fluorocarbonés empêchent la peinture du graffiti d'adhérer.

2. L'autre extrémité de la molécule doit, au contraire, former des liaisons solides avec le support pour garantir l'adhérence de la peinture.

9 1. Une espèce chimique avec un électron non apparié tend à former des liaisons chimiques, donc est réactive.

2. a. Les liaisons covalentes permettent le greffage de molécules antibactériennes sur le tissu.

b. La liaison covalente est une liaison forte, le produit antibactérien est fortement lié à la surface.

10 1. 1 : couronne de molécules ; 2 : principe actif ; 3 : capsule.

2. Taille du nanomédicament : environ 10^{-7} m = 100 nm.

3. a. Le diamètre de la capsule représente environ $1/4$ du diamètre total du nanomédicament, soit un rayon $R = 13$ nm environ. Le volume est donc $4/3\pi R^3$, soit environ 10^{-23} m³ ou encore 10 000 nm³.

b. Si on prend un rayon atomique de l'ordre de 0,1 nm, le volume correspondant est de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ nm}^3$. D'où un nombre d'atomes de l'ordre de $2 \cdot 10^7$.

11 1. a. Les longueurs d'onde du spectre de la lumière visible s'étendent de 400 à 750 nm.

b. On utilise la relation $E = hc/\lambda$. Les énergies sont donc comprises entre $2,7 \cdot 10^{-19}$ et $5 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

c. Les longueurs d'onde des rayonnements infrarouges sont plus élevées que celles des rayonnements visibles.

2. L'utilisation de tels vitrages évite l'échauffement derrière la vitre.

3. On constate une bonne transmittance dans le visible pour les deux cas, faible dans l'UV dans les deux cas et beaucoup plus faible dans l'IR pour le verre traité que pour le verre standard, ce qui était le but.

12 1. Un nanotube est une structure tubulaire de dimension nanométrique, constituée d'atomes placés aux sommets d'hexagones ou de pentagones.

2. La tension appliquée aux bornes du ruban mince contrôle sa déformation.

3. En biologie, le phénomène assurant la propagation de l'information nerveuse est le

potentiel d'action. Il s'agit d'une différence de potentiel, homogène à une tension.

4. Si le potentiel d'action est reçu par un capteur approprié, celui-ci pourrait déclencher un générateur créant une tension, qui provoquerait la contraction du muscle artificiel (en remplacement d'un muscle atrophié).

5. Il faut s'assurer de la biocompatibilité des matériaux utilisés pour que la greffe ne soit pas rejetée.

13 1. La peau est pourvue de cellules sensibles à la pression, permettant le sens du toucher. C'est pourquoi les chercheurs tentent de reproduire cette fonction en utilisant des capteurs de pression pour fabriquer une peau artificielle.

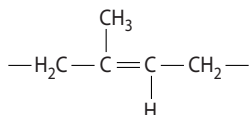
2. La peau est également sensible à la température, à l'humidité, etc.

3. a. La peau artificielle pourrait ainsi identifier des molécules présentes à sa surface (molécules biologiques, polluants déposés à sa surface, etc.).

b. Exemples d'applications pratiques : détecter des marqueurs biologiques de certaines maladies ; identifier la présence de produits dangereux pour l'organisme, présents dans l'air, etc.

F. Réponses aux sujets BAC p. 179-181

14 1.



2. On peut donner une forme précise aux matériaux plastiques.

3. a. Un objet fabriqué en caoutchouc brut se déformerait au cours du temps.

b. Cf. programme 1^{re} S : il existe des liaisons entre chaînes (puisque le matériau est élastique dans une certaine mesure), mais celles-ci sont faibles (puisque le matériau se déforme beaucoup). Il s'agit donc de forces de van der

Waals, qui assurent une certaine cohésion, mais permettent aux chaînes de glisser facilement les unes sur les autres.

4. a. Cf. programme 1^{re} S : le polymère est alors constitué de chaînes réticulées.

b. Il s'agit ici de liaisons covalentes, c'est-à-dire de liaisons beaucoup plus fortes que les forces de van der Waals.

5. La cohésion du caoutchouc après vulcanisation est beaucoup plus grande. La vulcanisation a créé des liaisons covalentes, de sorte que l'enchevêtrement initial de chaînes séparées est devenu un « filet », véritable réseau

tridimensionnel. Lorsqu'on applique une contrainte au matériau, les chaînes bougent les unes par rapport aux autres, mais sont moins libres de le faire que dans le caoutchouc brut.

Cela permet au caoutchouc de retrouver sa forme initiale après déformation. Le caoutchouc est alors élastique, tout en conservant une certaine plasticité.

15 1. Le carbure de bore doit être le plus dur.

2. Le diamant est le plus dur des matériaux connus (cf. document 1) ; il sert donc de référence. La dureté des autres matériaux est ainsi mesurée en évaluant leur résistance à la pression d'une pointe de diamant.

3. a. La dureté Vickers est le rapport d'une force sur une surface.

Elle est donc homogène à une pression (unité : Pa).

b. On retrouve l'approche intuitive : plus un matériau est dur, plus il est résistant à la pression. Un matériau mou, au contraire, se déforme sous l'effet d'une faible pression.

4. On a donc :

$$D_{\text{carbure}}/D_{\text{Al}} = d_{\text{Al}}^2/d_{\text{carbure}}^2 = 10^2 = 100, \\ \text{d'où } D_{\text{carbure}} = 100 \times 0,4 = 40 \text{ GPa.}$$

5. Le carbure de bore est quatre fois plus dur que l'acier. On retrouve de façon quantitative le résultat énoncé dans le document 1.

16 1. La couleur de la molécule varie avec le pH.

2. À un pH de 5,5 (donc inférieur à $pK_A = 7,2$), la forme acide de l'indicateur coloré prédomine. L'absorption correspondante est maximale pour une longueur d'onde autour de 480 nm, c'est-à-dire dans le bleu. La molécule M est donc de couleur jaune. C'est la couleur du pansement lorsque la plaie est saine.

3. a : plaie saine (pas d'infection), pansement jaune.

b : plaie infectée, pansement violacé (l'indicateur coloré absorbe dans le vert et colore donc le pansement en violet).

4. En cas d'infection cutanée, le pH au niveau de la plaie augmente, au-delà du pK_A de l'indicateur coloré. La plaie devient donc basique.

G. Science et société p. 81

Technologie.

Un matériau composite pour aller sur la Lune

1. Le phénol a pour formule $(C_6H_5)OH$; groupe caractéristique : hydroxyle.

2. La pyrolyse est une décomposition d'un composé organique par la chaleur.

3. Le PICA est composé de deux matériaux distincts non miscibles (fibres de carbone et résine phénolique).

H. Bibliographie

- ✓ É. Guyon, *Matière et matériau*, Belin-Pour la Science, 2011.
- ✓ J.-C. Lehmann, « Verre et produits verriers d'aujourd'hui et demain », *Bulletin de la S.F.P.*, n° 150, juillet-août 2005, http://sfp.in2p3.fr/bulletin/SFP150_Lehmann.pdf
- ✓ *Les nanomondes*, Brochure CEA-Jeunes, 2008, www.cea.fr/content/download/5463/35705/file/nanomonde.pdf
- ✓ Nanomètre, nanosciences, nanotechnologies... quelques notions de base pour se repérer dans le nanomonde : www.cea.fr/technologies/nanotechnologies_et_nanosciences/nanosciences_et_nanotechnologies_quelques_reper

- ✓ « Prix international de l'innovation textile », *L'Industrie Textile*, 2010, www.up-tex.fr/fileadmin/user_upload/Documents/Espace_presse/Recherche_et_formation/2010-04-22_INDUSTRIE_TEXTILE_un_textile_retard_au_feu.pdf
- ✓ F. Daninos, « Le graphène, matériau de l'année », *La Recherche*, n° 426, janv. 2009, www.larecherche.fr/content/recherche/article?id=24626
- ✓ J.-L. Goudet, « Des nanoconducteurs en plastique... qui se construisent tout seuls », *Futura Sciences*, 2012, www.futura-sciences.com/fr/news/t/informatique/d/des-nanoconducteurs-en-plastique-qui-se-construisent-tout-seuls_38379/
- ✓ D. Carlac'h et Y. Hemery, « Étude prospective sur les nanomatériaux », 2004, www.industrie.gouv.fr/enjeux/pdf/synthesenanomateriaux.pdf
- ✓ *Nanotechnologies : le nouveau monde du 21^e siècle ?*, dossier documentaire Universcience, www.universcience.fr/fr/bibliotheque-bis/content/c/1248108490827/nanotechnologies-le-nouveau-monde-du-21e-siecle/
- ✓ « Fibres et textiles chimiques : matériaux du 21^e siècle », *L'Actualité Chimique*, n° 360-361, fév.-mars 2012.
- ✓ M. Zaffagni, « Un verre autonettoyant, antireflet et antibuée », *Futura Sciences*, 2012, www.futura-sciences.com/fr/news/t/technologie-1/d/un-verre-autonettoyant-antireflet-et-antibuée_38534/

Sujet BAC 1 p. 186

1. Le liant organique serait susceptible d'être en partie dégradé par la photocatalyse, contrairement au liant en silice, totalement transparent aux UV d'après le document 2.

2. Le reactive red-4 absorbe dans le visible et possède des doubles liaisons conjuguées. Cette molécule est donc colorée. Le maximum d'absorption se situe à 517 nm, ce qui correspond à la couleur verte. Donc la couleur observée est le rouge.

3. Il y a photoconduction si $E_{\text{photon}} > E_G$. Soit : $h\nu > E_G \Leftrightarrow \frac{hc}{\lambda} > E_G \Leftrightarrow \lambda < \frac{hc}{E_G}$.

Application numérique : $\lambda_{\text{lim}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 3,0 \cdot 10^8}{3,2 \times 1,6 \cdot 10^{-19}}$, soit $\lambda_{\text{lim}} = 388 \text{ nm}$.

4. Les textiles autonettoyants sont imprégnés de photocatalyseur TiO_2 susceptible d'absorber les rayonnements UV du Soleil : cela induit un cycle photocatalytique dans lequel le dioxygène et l'humidité (H_2O) de l'air sont transformés en radicaux $\text{HO}^\bullet$. Ces derniers jouent un rôle primordial en oxydant progressivement les molécules organiques responsables des odeurs (par exemple, l'acide valérique), les colorants (le reactive red-4, en supprimant petit à petit la conjugaison), ainsi que les graisses en CO_2 et H_2O . Les molécules organiques polluantes sont ainsi transformées en déchets minéraux. Ces textiles autonettoyants sont donc plus écologiques à l'usage que la lessive.

Sujet BAC 2 p. 187

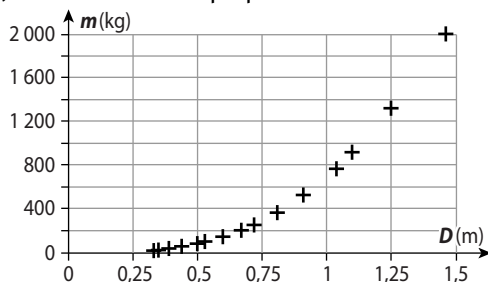
Erratum : dans le document 1, il faut lire : « [...] d'une cloche qui joue un Do grave (Do1). »

– La masse m de la cloche est reliée à son volume V et à la masse volumique ρ du métal utilisé par : $m = \rho V$.

Avec une épaisseur e constante (métal martelé), la masse de la cloche est : $m = \frac{\rho \pi e}{4 \sin \alpha} D^2$ (en utilisant la relation donnée dans le document 3), la masse est donc proportionnelle à D^2 .

– Avec une épaisseur e proportionnelle au diamètre (métal fondu), on a $e = kD$ (k étant une constante). On en déduit la relation : $m = \frac{\rho \pi k}{4 \sin \alpha} D^3$, la masse est donc proportionnelle à D^3 .

– À l'aide des valeurs données dans le document 2 et d'un tableur scientifique, on place les points de coordonnées ($D ; m$).

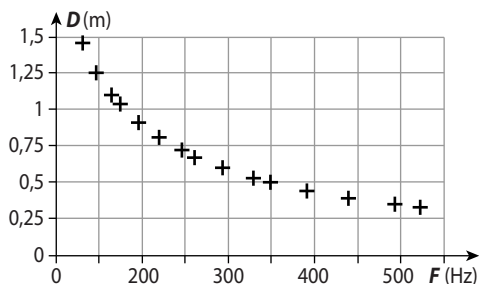


À l'aide du tableur scientifique, les données sont modélisées selon les fonctions $m = aD^2$ et $m = bD^3$.

Seule la fonction $m = bD^3$ s'ajuste correctement sur les points tracés, avec un écart relatif de 3 % (l'écart relatif obtenu avec la fonction $m = aD^2$ est de 18 %). L'équation de la courbe est $m = 661D^3$, avec m exprimé en kg et D en m.

La série de cloches présentée est donc fabriquée selon la technique traditionnelle (métal fondu).

– On place ensuite les points de coordonnées (F ; D).



Lorsque la fréquence augmente, le diamètre diminue. On peut donc proposer de modéliser les données selon la fonction $D = \frac{c}{F}$. Cette fonction s'ajuste correctement sur les points tracés avec un écart relatif de 3 %, selon l'équation $D = \frac{181}{F}$, avec D exprimé en m et F en Hz.

Pour une cloche jouant un Do1, la fréquence correspondante est la moitié de celle du Do2, soit 65,4 Hz. Par le calcul, on en déduit le diamètre de la cloche :

$$D = \frac{181}{65,4} = 2,77 \text{ m, soit } 277 \text{ cm.}$$

On peut maintenant calculer la masse de la cloche : $m = 661 \times 2,77^3 = 14\,000 \text{ kg}$, soit 14 tonnes. Le clocher ne peut donc pas accueillir la cloche commandée en raison de sa masse trop importante.

Le maître saintier peut proposer de fabriquer une cloche moins lourde en diminuant son épaisseur e , mais le timbre de l'instrument risque d'être médiocre. Une autre possibilité serait de proposer une cloche qui joue une note moins grave (par exemple Mi1 à 82,4 Hz). Ses caractéristiques ($D = 220 \text{ cm}$; $m = 7\,040 \text{ kg}$) seraient ainsi adaptées au clocher auquel elle est destinée, tout en maintenant la qualité de son timbre.

Sujet BAC 3 p. 188

Le prix des couches-culottes varie fortement d'une marque à l'autre, peut-être comme leur composition : les fabricants ne l'indiquent pas clairement. Ce sujet aborde l'utilisation de polymères superabsorbants dans certaines couches-culottes.

Plusieurs compétences de l'enseignement spécifique sont mises en jeu ici, dont :

- reconnaître un acide, une base dans la théorie de Brønsted ;
- identifier l'espèce prédominante d'un couple acide-base connaissant le pH du milieu et le pK_A du couple.

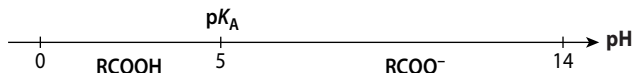
En outre, ce sujet aborde les interactions de van der Waals et les liaisons hydrogène qui figurent au programme de 1^{re} S.

Réponses aux questions

1. a. Les ions Na^+ sont retenus au sein du polymère par une interaction électrostatique avec les groupes carboxylates -COO^- . Comme dans l'expérience mettant en évidence le phénomène d'osmose (document 4), seule l'eau peut se déplacer vers l'intérieur du polymère pour y diminuer la concentration en ions Na^+ , plus importante que dans le milieu extérieur.

b. Si le milieu extérieur au PSA contient déjà des ions Na^+ , le flux d'eau nécessaire à l'égalisation des concentrations dans les deux milieux (PSA et solution salée) est moins important.

2. a. Diagramme de prédominance du couple R-COOH/R-COO^- :



À $\text{pH} = 7$ (urines), la forme R-COO^- est bien majoritaire.

b. L'eau peut établir des liaisons hydrogène avec le groupe carboxylate. D'autre part, ce groupe est polaire, comme l'eau. Des interactions de van der Waals, attractives, favorisent également la rétention de l'eau.

3. a. L'insertion d'eau entre les chaînes du polymère tend à éloigner les chaînes les unes des autres (voir l'image du filet de pêche dans le document 3), ce qui fait gonfler le polymère.

b. Sans réticulation, le polymère, hydrosoluble, serait dissous par le milieu aqueux et s'écoulerait avec le liquide. La réticulation permet de maintenir les chaînes ensemble et évite leur dispersion dans le liquide. Le matériau reste cohésif malgré l'absorption d'eau.

Sujet BAC 4 p. 189

1. Lorsqu'on souffle dans une bouteille vide, la pression de l'air à l'intérieur de la bouteille subit des variations périodiques. Si la fréquence de ces oscillations est égale à la fréquence propre de la colonne d'air constituée par la bouteille, alors un son est émis par résonance.

2. D'après la relation donnée dans le document 1, on peut écrire :

$$V = \frac{S}{L} \left(\frac{c}{2\pi F} \right)^2 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 0,23 \text{ L.}$$

Le volume d'eau à ajouter dans la bouteille est donc $V_{\text{eau}} = V_{\text{à vide}} - V = 1,27 \text{ L}$.

3. Dans un trombone à coulisse, les lèvres du tromboniste jouent le rôle d'excitateur ; le résonateur est constitué du corps de l'instrument.

4. $\lambda_t = \frac{c}{F}$, donc $F = 154 \text{ Hz}$.

5. La présence des vases acoustiques dans les théâtres antiques limite la réverbération en absorbant une partie des ondes sonores reçues.

Les sons émis dans ces théâtres étaient principalement des voix humaines. La plage de fréquence sur laquelle ils doivent être accordés est donc l'intervalle des fréquences émises par la voix humaine, soit entre 300 et 10 000 Hz.

6. Les vases ont une forme complexe qui leur permet d'avoir un grand nombre de fréquences propres dans un certain intervalle. Cet intervalle de fréquences absorbées correspond à la bande passante du vase.

7. Un résonateur peut donc à la fois amplifier un son ou l'atténuer. Ainsi, les instruments de musique, qu'ils soient à vent, à cordes ou à percussion, possèdent tous une caisse de résonance

qui permet d'amplifier certaines fréquences. Par ailleurs, les murs d'une salle sourde sont recouverts d'un matériau absorbant à alvéoles. Ces alvéoles sont des résonateurs qui permettent d'augmenter le caractère absorbant du matériau.

Sujet BAC 5 p. 190

1. Lors de la synthèse proposée pour le chitosane, les groupes amide sont remplacés par des groupes amine.

La bande à $1\,655\text{ cm}^{-1}$ est liée à l'absorption par la double liaison $\text{C}=\text{O}$ de l'amide. Il y a donc un lien entre l'aire de cette bande et la quantité de groupements amide présents dans l'échantillon (et donc dans le polymère).

On a le même raisonnement pour S_{3450} , qui quantifie le nombre de groupements hydroxyles présents dans l'échantillon. Or, celui-ci ne change pas lors de la transformation de la chitine en chitosane.

Ainsi, quand des groupes amides sont transformés en groupes amines (transformation de chitine en chitosane), S_{1655} diminue, donc le rapport $\frac{S_{1655}}{S_{3450}}$ diminue, ce qui implique que DD augmente.

La grandeur DD permet donc de suivre la quantité de groupes azotés qui ont été transformés.

2. a. Il faut faire une distinction suivant le cation contenu dans la solution.

– Avec les ions cuivre, la quantité restante dans ces conditions est nulle d'après le graphique, donc il n'est pas utile de poursuivre l'agitation, l'eau semble dépolluée.

– Avec les ions cobalt, il en reste de l'ordre de 15 % après 30 minutes ; il est possible qu'une poursuite de l'agitation permette de diminuer encore leur quantité.

b. Pour avoir une bonne sensibilité lors de la mesure, il est préférable de se placer au maximum d'absorption pour le cation considéré, qui semble être de 790 nm pour les ions cuivre(II) et de 510 nm pour les ions cobalt(II) d'après le graphique.

3. « Vous cherchez un moyen efficace et écologique pour le traitement des métaux lourds contenus dans les eaux à traiter ? Nous vous proposons pour cela une substance innovante, le chitosane, qui saura vous convaincre par ses nombreux avantages :

– il permet l'élimination de plusieurs métaux lourds sous forme de cations, comme les ions Co^{2+} et Cu^{2+} ;

– son prix de revient est très modeste, puisqu'il est issu de déchets produits en grande quantité par les conserveries de crustacés ;

– c'est une substance écologique à tous points de vue : sa production permet la valorisation de déchets qui pourraient être source de pollution ; son caractère biodégradable garantit qu'il ne deviendra pas une source de pollution excessive pour les eaux que vous aurez traitées avec son aide. »