

Nouveau programme

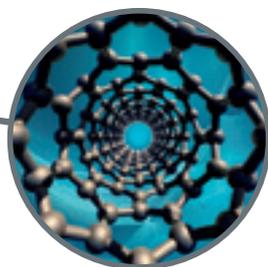
T
S

COLLECTION **DULAURANS** **DURUPHTY**

Physique Chimie

Enseignement de spécialité

Livre du professeur



hachette
ÉDUCATION

Physique Chimie

T S

Enseignement de spécialité

Livre du professeur

Sous la direction de

Thierry DULAURANS
Lycée Fernand-Daguin à Mérignac

André DURUPHTY
Lycée Paul-Cézanne à Aix-en-Provence

Michel BARDE
Lycée Marcel-Pagnol à Marseille

Nathalie BARDE
Lycée Saint-Charles à Marseille

Jean-Philippe BELLIER
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Vincent BESNARD
Lycée Montesquieu à Bordeaux

Marc BIGORRE
Lycée des Graves à Gradignan

Julien CALAFELL
Lycée Bellevue à Toulouse

Éric DAINI
Lycée Paul-Cézanne à Aix-en-Provence

Maryline DAINI-D'INCAN
Lycée Maurice-Janetti
à Saint-Maximin-la-Sainte-Baume

Marie des Neiges DE FLAUGERGUES
Lycée du Grésivaudan à Meylan

Magali GIACINO
Lycée Paul-Cézanne à Aix-en-Provence

Nicolas LESCURE
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Vanina MONNET
Lycée Michel-Montaigne à Bordeaux

Bruno POUDENS
Lycée des Graves à Gradignan

Isabelle TARRIDE
Lycée Val de Durance à Pertuis

Sommaire

Erratum.....	3
--------------	---

Thème 1 : L'eau

1 Eau et environnement	4
2 Eau et ressources	13
3 Eau et énergie	22

Thème 2 : Son et musique

4 Émetteurs et récepteurs sonores	29
5 Instruments de musique	35
6 Son et architecture.....	46

Thème 3 : Matériaux

7 Cycle de vie des matériaux	51
8 Structure et propriétés des matériaux	61
9 Nouveaux matériaux.....	73

Pages Bac : exercices et TP.....	80
----------------------------------	----

Compléments

Évaluation des incertitudes de mesure	86
---	----

Couverture :
Pierre-Antoine Rambaud
Suivi éditorial :
Patricia Lamy
Maquette intérieure et composition :
PCA/CMB Graphic
Schémas :
Patrick Hanequand et Jean-Luc Maniouloux

Erratum

Lors de la réimpression de l'ouvrage, certaines erreurs ont été corrigées. Il est donc possible qu'il y ait différentes versions dans votre classe. Voici la liste des corrections qui nous semblent importantes.

Les éléments modifiés sont surlignés en jaune.

Chapitre 4

Page 68, document 3

Dans le graphique, il faut remplacer la valeur « 1 000 » par « 1 600 ».

Chapitre 5

Page 95

Dans la question 3, il faut lire : $r_2 = \frac{d'}{d}$.

Chapitre 6

Page 111

La seconde question 3 doit être numérotée 4.

Page 121, problème 4

Dans l'énoncé, il faut lire : « ...Cette salle possède deux portes en bois, de hauteurs respectives $d_1 = 2,0$ m et $d_2 = 1,0$ m (la surface de ces deux portes est de $4,0$ m²), et deux baies vitrées, de surfaces respectives $S_1 = 16$ m² et $S_2 = 10$ m². On a disposé dans cette salle des chaises en bois dont la surface d'absorption équivalente totale est de 100 m² ».

Eau et environnement

Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 Mers et océans, réservoirs d'eau sur Terre (p. 12)

$$1 \text{ a. } \frac{V(\text{Pacifique})}{V(\text{hydrosphère})} = \frac{715 \times 10^6}{1409 \times 10^6} = 0,51 = 51 \%$$

$$b. \frac{V(\text{calottes})}{V(\text{océans})} = \frac{29 \times 10^6}{1370 \times 10^6} = 2 \times 10^{-2} = 2 \%$$

$$2 \frac{S(\text{océans})}{S(\text{Terre})} = \frac{361 \times 10^6}{510 \times 10^6} = 0,71 = 71 \%$$

$$\frac{V(\text{océans})}{V(\text{hydrosphère})} = \frac{1370 \times 10^6}{1409 \times 10^6} = 0,97 = 97 \%$$

3 a. L'eau biosphérique est l'eau contenue dans les êtres vivants.

$$b. \frac{V(\text{biosphère})}{V(\text{hydrosphère})} = \frac{0,0006 \times 10^6}{1409 \times 10^6} = 4 \times 10^{-7} = 4 \times 10^{-5} \%$$

4 **Bilan** a. Dans l'atmosphère, il y a évaporation, puis condensation ; l'eau ruisselle ensuite vers les océans et s'infiltre dans les roches (pédosphère et lithosphère).

b. L'érosion est la dégradation, l'usure des roches de l'écorce terrestre par un agent extérieur (eau, agents atmosphériques). Le degré d'érosion dépend des

propriétés des roches (dureté, dilatation, composition chimique, etc.).

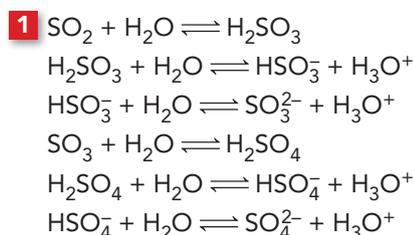
La *concrétion* correspond à des agrégats de particules en un corps solide. Par exemple, les stalactites se forment par concrétion.

La *dissolution* est le passage en solution d'une espèce solide, liquide ou gazeuse. Par exemple, la dissolution dans l'eau du trioxyde de soufre (gaz).

Par l'action de l'eau (ruissellement), des rigoles de *dissolution* se forment sur les sols. La roche est déshiquetée ; apparaissent alors des aspérités, des trous, des crevasses, etc. L'action de l'érosion est inégale : les roches les plus résistantes forment des reliefs, alors que les roches les moins résistantes forment des creux. Les gouffres sont le plus souvent formés par l'effondrement de la voûte d'une cavité souterraine au cours de la *dissolution*, par les eaux, des minéraux formant les roches. Lorsque l'eau circule dans le sous-sol, elle se charge d'ions et peut déboucher dans une cavité souterraine : un phénomène inverse de la *dissolution* va se produire.

Des *concrétions* se forment telles que les stalactites, stalagmites, draperies, piliers, etc.

2 Dissolution des espèces : les pluies acides (p. 13)



2 a. Ce sont les émissions dues à l'activité humaine (du grec *anthropos* signifiant « homme »).

$$\bullet \text{ Valeur basse : } \frac{V(\text{combustion})}{V(\text{total})} = \frac{160}{160 + 80 + 10} = 0,64 = 64 \%$$

$$\bullet \text{ Valeur haute : } \frac{V(\text{combustion})}{V(\text{total})} = \frac{240}{240 + 200 + 20} = 0,52 = 52 \%$$

b. Elles auraient tendance à décroître, car des mesures gouvernementales ont été prises pour limiter les émissions industrielles de dioxyde de soufre.

3 Les gaz azotés qui participent à la formation des pluies acides sont le monoxyde d'azote, NO, et le dioxyde d'azote, NO₂. Le gaz chloré est l'acide chlorhydrique, HCl.

4 **Bilan** Les pluies acides résultent de la dispersion dans l'atmosphère de polluants comme le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO_x). Ces polluants peuvent être produits naturellement par les éruptions volcaniques, la décomposition biologique, les océans, les feux de forêts, etc.

Dans l'atmosphère, les polluants sont dispersés par le vent. Les plus lourds retombent à proximité ; les

plus légers voyagent dans les hauts courants aériens sur des milliers de kilomètres.

Les pluies acides entraînent l'acidification des sols et des cours d'eaux et donc une modification, voire une disparition, de la flore et de la faune. La dissolution de métaux toxiques comme l'aluminium est favori-

sée. Même si leurs causes ne sont pas encore clairement identifiées, les dépérissements forestiers se multiplient. Les constructions urbaines ne sont pas épargnées : les surfaces métalliques s'érodent, les monuments en pierre calcaire ou en grès s'effritent peu à peu.

3 Courants océaniques, régulateurs du climat (p. 14)

1 La circulation thermohaline (circulation permanente à grande échelle de l'eau des océans) est due aux écarts de températures et de salinités des masses d'eau.

2 a. Les eaux salées sont plus denses que les eaux douces puisque du sel est dissous : pour un volume donné, la masse de la solution est plus grande ; ainsi, la masse volumique de l'eau salée (et donc la densité) augmente. Les eaux liquides de surface sont très salées dans les régions polaires, car le sel non piégé dans la glace se dissout dans l'eau liquide des océans sous la banquise.

b. Les eaux froides sont plus denses que les eaux chaudes et les eaux salées sont plus denses que les eaux douces : une eau froide et salée a donc tendance à plonger.

3 Bilan Le *Gulf Stream* est un courant océanique qui prend sa source entre la Floride et les Bahamas

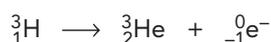
(Golfe du Mexique), longe la côte américaine, se dirige vers le nord-est de l'océan Atlantique en remontant vers le Groenland après avoir longé les côtes européennes. Il est poussé par les vents dominants du sud-ouest et se refroidit progressivement. Il déplace l'eau chaude des zones subtropicales vers les pôles et constitue un facteur important de la régulation du climat européen. La chaleur ainsi stockée dans l'eau des zones tropicales est restituée vers l'atmosphère aux plus hautes latitudes. Comme l'atmosphère, les courants marins comme le *Gulf Stream* répartissent la chaleur autour du globe. L'océan joue un rôle déterminant sur le climat : l'eau se réchauffe moins vite que l'air, mais se refroidit aussi moins vite. L'océan a une « mémoire » plus longue que l'atmosphère : de l'ordre d'une saison pour les courants de surfaces, d'une dizaine d'années pour les masses d'eaux profondes.

4 Les traceurs chimiques (p. 15)

1 Toutes les espèces chimiques, qu'elles soient naturelles, c'est-à-dire naturellement présentes dans la nature (tels que le dioxygène dissous, les ions phosphate dissous, PO_4^{3-} , etc.), ou anthropiques (pesticides, produits de la fusion thermonucléaire, etc.) transitent dans l'océan et constituent donc des traceurs chimiques.

Fréon est le nom commercial d'une famille de gaz hydrochlorofluorocarbonés (HCFC) ou chlorofluorocarbonés (CFC). Ces gaz sont ou ont été utilisés comme réfrigérants, gaz propulseurs, intermédiaires de synthèse, etc.

2 a. Le tritium se transforme en hélium 3 selon la réaction suivante :



Dans la nature, la plupart des noyaux d'atomes sont stables. Cependant, certains atomes ont des noyaux instables qui se désintègrent spontanément. La désintégration radioactive d'un noyau donné est un phénomène aléatoire. L'activité (mesurée en becquerel ; 1 Bq = une désintégration par seconde) d'un échantillon radioactif diminue avec le temps du fait de la disparition progressive des noyaux instables qu'il contient. Ces noyaux radioactifs se caractérisent

par leur durée de demi-vie, ou période radioactive, temps au bout duquel la moitié des noyaux radioactifs initialement présents a disparu. En évaluant la quantité de tritium restant dans un volume d'eau donné, on dispose de chronomètres utiles pour étudier les différentes cinétiques de processus présents dans la colonne d'eau. Ils permettent de suivre, dans le temps et l'espace, le transport des masses d'eau : ce sont les traceurs de la circulation océanique.

b. Le tritium pénètre en profondeur par le nord : il a été entraîné par des courants plongeants.

3 a. L'*advection* est le transfert d'une masse d'eau par un mouvement naturel.

Les *isolignes* sont des courbes d'égale valeur d'une grandeur, tracées sur un schéma ou un diagramme à deux ou trois dimensions.

b. Le flux de fréons se dirige vers le sud-est.

4 Bilan La présence, dans les eaux profondes, de traceurs anthropiques, émis dans l'atmosphère il y a plusieurs décennies, indique que les eaux ont été en contact avec l'atmosphère durant ces dernières décennies. Le traceur est absorbé par l'eau, à la surface de l'océan. Si cette eau quitte la surface et plonge en profondeur, elle est isolée de l'atmosphère

et la quantité de tritium qu'elle renferme diminue par décroissance radioactive (voir les compléments à la question 2a ci-dessus). Ces traceurs sont suivis comme des colorants injectés à grande échelle dans l'océan. Ils permettent de tracer la ventilation des

eaux profondes, c'est-à-dire le renouvellement de ces eaux par mélange avec des eaux ayant été plus récemment au contact avec l'atmosphère, donc plus riches en traceur.

5 Pollution aux plastiques : le 8^e continent (p. 16)

1 Les *polymères* (du grec *pollus* signifiant « plusieurs » et *méros* signifiant « parties ») sont formés de macromolécules renfermant des centaines, voire des milliers d'atomes de carbone. Ces macromolécules sont fabriquées à partir d'un grand nombre de molécules plus petites, que l'on appelle monomères, reliées entre elles par des liaisons covalentes.

La *photodégradation* est la transformation de molécules en fragments plus petits sous l'influence de la lumière (absorption de photons).

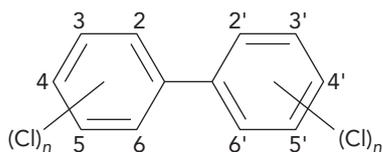
Un *perturbateur endocrinien* est une espèce chimique agissant sur l'équilibre hormonal.

Un *xénobiotique* est une substance étrangère à un organisme vivant (du grec *xenos* qui signifie « étranger » et *bios* qui signifie « vie »).

Une substance *hydrophobe* repousse l'eau ou est repoussée par l'eau (du grec *hydro* signifiant « eau » et *phobos* signifiant « peur »).

2 Selon leur nature, les polymères résistent à l'oxydation, aux acides, aux bases, aux solvants, etc. Le rejet et l'accumulation des matières plastiques dans l'environnement n'avaient donc pas été jugés alarmants.

3 a. Les polychlorobiphényles (PCB), parfois appelés « pyralènes », sont des composés aromatiques organochlorés dérivés du biphényle :



Les PCB sont toxiques, écotoxiques et reprotoxiques (dans le système international d'étiquetage des matières dangereuses, ils sont classés H373, ce qui correspond à un risque présumé d'effets graves pour les organes à la suite d'expositions répétées ou d'une exposition prolongée, et H410, c'est-à-dire très toxiques pour les organismes aquatiques, qui entraînent des effets néfastes à long terme).

b. Les PCB sont des aromatiques constitués de nombreux atomes de carbone; ce sont des molécules très peu polaires malgré la présence d'atomes de chlore. Ils se concentrent donc préférentiellement dans les matières plastiques (composées d'un grand nombre d'atomes de carbone) plutôt que dans l'eau des océans.

4 De nombreux adjuvants (plastifiants, stabilisants, etc.) sont incorporés aux matières plastiques : ces xénobiotiques peuvent s'avérer très dangereux.

5 Bilan Les matières plastiques se fragmentent sous l'effet de la lumière, des variations de température, de l'action mécanique des courants, etc. Les courants marins les accumulent dans des zones particulières des océans.

6 Pollution au pétrole : Deepwater horizon (p. 17)

1 a. Les hydrocarbures sont hydrophobes : ils ne se dissolvent pas dans l'eau et, entraînés par les courants, ils s'accumulent dans des zones particulières des océans.

b. Il existe quatre grandes familles de produits chimiques de lutte contre la pollution : les dispersants, les produits de lavage, les désémulsifiants et les biodégradants.

Les dispersants sont pulvérisés par moyens aériens ou par embarcations. Les désémulsifiants sont des produits liquides destinés à briser les émulsions pâteuses d'eau dans le pétrole que l'on récupère sur le littoral ou en mer. Simultanément, il faut absolu-

ment veiller à contenir la nappe polluante à l'aide de barrages flottants. Une pollution peut être contenue avec des barrages absorbants (absorbants hydrophobes pour récupérer les produits apolaires et fixer le polluant par imprégnation) ou des barrages de rétention gonflables (fabriqués en tissus polyester haute densité enduits de PVC).

2 Bilan a. La crainte majeure était une pollution des côtes, mais surtout que la nappe ne rejoigne le *Gulf Stream* et soit donc dispersée très loin.

b. Le *Loop Current* a maintenu la nappe près des côtes et les *Loop Eddies* ont piégé le pétrole et ont contribué à sa fragmentation.

Pour aller plus loin

- Page 13 :
http://www.inra.fr/audiovisuel/films/environnement/pluie_acide
- Page 14 :
<http://www.ifremer.fr/lpo/cours/index.html>
http://video.sciencesetavenir.fr/video/xq8byg_oceans-dans-les-tourbillons-des-courants-oceaniques_tech.html
http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosclim/contenu/alternative/alter2_textes.html
- Page 15 :
http://www.ice.uvsq.fr/web/webICE13.html#systeme_clim
- Page 16 :
<http://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/20110623.OBS5764/petits-plastiques-gros-degats-en-meditteranee.html>
- Page 17 :
http://www.cedre.fr/fr/accident/deepwater_horizon/dossiers.php
<http://www.usatoday.com/news/nation/oil-spill-map.htm>

Pratique expérimentale

1 Dosage du dioxyde de soufre (p. 18)

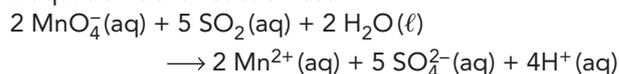
Matériel et produits

- Une solution aqueuse de dioxyde de soufre ;
- une solution aqueuse de permanganate de potassium à $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution aqueuse d'hydroxyde de sodium ;
- une solution aqueuse de chlorure de baryum ;
- une pipette ;
- une pipette jaugée et une propipette ;
- quatre tubes à essais ;
- une burette graduée ;
- un erlenmeyer ou un bécher ;
- un agitateur magnétique et un barreau aimanté.

B Étude qualitative

- 1 Une réaction se produit, car il y a décoloration de la solution.
- 2 Il se forme des ions manganèse, $\text{Mn}^{2+}(\text{aq})$, et des ions sulfate, $\text{SO}_4^{2-}(\text{aq})$.
- 3 Les couples impliqués sont $\text{SO}_4^{2-}(\text{aq})/\text{SO}_2(\text{aq})$ et $\text{MnO}_4^{-}(\text{aq})/\text{Mn}^{2+}(\text{aq})$.

L'équation de la réaction est :



4 Lorsqu'on poursuit l'addition de permanganate, la solution ne se décolore plus, car les ions permanganate sont en excès.

5 Cette réaction peut être utilisée puisqu'il y a un changement de couleur de la solution lorsqu'il y a un changement de réactif limitant.

C Étude quantitative

$$6 \quad n(\text{SO}_2)_{\text{introduit}} = \frac{5}{2} n(\text{MnO}_4^{-})_{\text{versé}}$$

7 Pour une prise d'essai de volume $V_2 = 10,0 \text{ mL}$, on a trouvé $V_{1\text{éq}} = 9,7 \text{ mL}$, soit :

$$[\text{SO}_2] = 2,4 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

$$8 \quad n(\text{S}) = \frac{m(\text{S})}{M(\text{S})} = \frac{1,00}{32,1} = 3,11 \times 10^{-2} \text{ mol}; \text{ soit :}$$

$$[\text{SO}_2] = 3,11 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}.$$

L'écart constaté vient du fait que tout le dioxyde de soufre dégagé ne se dissout pas dans l'eau.

2 Le moteur des courants océaniques (p. 19)

Matériel et produits

- Une lampe à incandescence ou lampe halogène ;
- un aquarium ;
- un morceau de glace (environ 1 L) ;
- une cartouche d'encre ;
- quatre béchers ;
- de l'eau salée ;
- des glaçons d'eau douce et d'eau salée colorés avec de l'encre ;
- un disque tournant à vitesse constante, un glaçon.

A Rôle de la température et de la salinité de l'eau

1 L'encre colorée suit les mouvements de l'eau et permet donc de suivre le courant qui s'établit. Ce courant plonge du côté du glaçon, circule au fond de l'aquarium jusqu'au côté opposé où se trouve la lampe, puis il remonte.

2 Cette circulation d'eau est due à la différence de densité entre l'eau froide et l'eau chaude : du côté

du glaçon, les eaux froides plus denses plongent alors que, du côté de la lampe, les eaux sont ensuite réchauffées et donc moins denses : elles remontent.

3 Des courants amènent des eaux froides dans les zones tropicales chaudes et inversement, les eaux chaudes des zones tropicales repartent vers les pôles.

4

	Glaçon d'eau douce	Glaçon d'eau salée
Eau douce	L'eau douce et froide du glaçon plonge sous le glaçon, le milieu s'homogénéise (1).	L'eau salée et froide du glaçon tombe rapidement vers le fond, une pellicule incolore se forme en surface (3).
Eau salée	Une pellicule colorée se forme en surface (2).	L'eau salée froide du glaçon plonge sous le glaçon, le milieu s'homogénéise (4).

5 L'observation (2) montre que de l'eau froide peut être moins dense que de l'eau salée. Les observations (1) et (4) montrent que des eaux froides ont tendance à plonger : elles sont plus denses que des eaux plus chaudes de même composition. L'observation (3) montre que l'eau salée et froide est nettement plus dense que de l'eau douce.

Les eaux salées et froides de l'Atlantique Nord et de l'Antarctique plongent effectivement pour alimenter les courants d'eaux profondes. Ces eaux réchauffées sous les Tropiques ont bien tendance à rester en surface.

6 La circulation *thermohaline* est une circulation d'eau liée à la température (*thermo*) et à la salinité (*haline*).

3 Les agents dispersants (p. 20)

Matériel et produits

- Deux cadres métalliques avec fils (voir les documents 5 et 6, p. 20);
- un cristalliseur;
- du liquide vaisselle;
- une plaque de verre très propre;
- une pipette pasteur;
- une coupelle;
- un trombone;
- deux béchers;
- une éprouvette de 10 mL;
- de l'huile;
- un agitateur en verre.

A Tension superficielle

1 Le fil est soumis à des forces exercées par les différents films. Ces forces se compensent lorsque tous les films sont intacts. Lorsqu'un des films est percé, la

B Rôle de la force de Coriolis, due à la rotation de la Terre

7 a. Dans le référentiel du laboratoire la trajectoire du glaçon est rectiligne (1^{re} loi de NEWTON).

b. Lorsque le disque tourne, vu de dessus, dans le sens trigonométrique, le glaçon est dévié vers la droite de son mouvement, dans le référentiel du disque.

Lorsqu'il tourne dans le sens horaire, le glaçon est dévié vers la gauche de son mouvement, dans le référentiel du disque.

c. La force de Coriolis est une force d'inertie qui s'exerce sur tout corps en mouvement dans un référentiel en rotation par rapport à un référentiel galiléen. Elle s'exerce perpendiculairement au mouvement. Cette force peut être qualifiée de fictive, car elle ne résulte pas de l'interaction entre deux objets. Pour un observateur placé dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen, le glaçon ne subit que deux forces (poids et réaction du support) qui se compensent : le mouvement est rectiligne et uniforme.

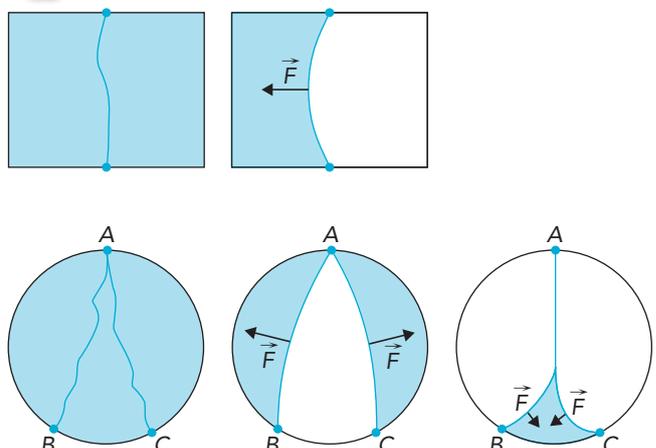
Pour un observateur placé sur le disque tournant, le mouvement n'est pas rectiligne et uniforme, les forces s'appliquant sur le glaçon ne se compensent pas : cela est dû à la force de Coriolis.

8 a. Le *Gulf Stream* est un courant océanique qui prend sa source entre la Floride et les Bahamas, parcourt l'océan Atlantique en remontant vers le Groenland après avoir longé les côtes européennes.

b. Le *Gulf Stream* remonte vers le nord, où il est dévié par la force de Coriolis vers la droite de son mouvement, c'est-à-dire vers l'est.

surface de l'autre film diminue : le film d'eau savonneuse exerce donc des forces attractives (dirigées du fil vers le film). On peut identifier ces forces aux forces de tension superficielle qui s'exercent sur la surface d'un liquide.

2 Schématisation des expériences :



3 La cohésion des molécules d'eau est assurée par des forces électrostatiques (liaisons hydrogène et forces de van der Waals). À l'intérieur du liquide, le milieu est homogène, la somme des forces qui s'exercent sur une molécule est en moyenne nulle. En revanche, pour les molécules de la couche superficielle, le milieu n'est plus homogène et elles ne subissent que l'action des molécules d'eau en dessous d'elles. Il en résulte l'apparition de forces, dites de tension superficielle, s'exerçant sur les molécules de surface et dirigées vers l'intérieur du liquide.

B Action des tensioactifs

4 La goutte d'eau a une forme plus ronde que la goutte du mélange eau-détergent qui s'étale davantage sur la plaque de verre.

La surface de contact avec l'air (surface libre) de l'eau est inférieure à celle du mélange savonneux. Les forces de tension superficielle tendent à diminuer la surface libre d'un liquide.

Le trombone peut flotter sur de l'eau, mais coule sur de l'eau savonneuse. Le pouvoir mouillant de l'eau savonneuse est supérieur à celui de l'eau. Les valeurs des forces de tension superficielle sont plus grandes dans le cas de l'eau que dans celui du mélange.

5 Un tensioactif augmente la surface de contact entre un liquide et le milieu extérieur, il diminue la valeur des forces de tension superficielle.

C Dispersion d'une nappe d'huile

6 Le détergent permet de créer une émulsion eau-huile et donc d'assurer la dispersion de l'huile dans l'eau.

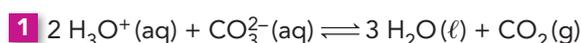
7 Les chaînes hydrophobes des tensioactifs se « tournent » vers la nappe de pétrole, les têtes hydrophiles dirigées vers l'eau de mer; par agitation naturelle de l'eau de mer, il se forme des micelles dans lesquelles se trouve un liquide hydrophobe (le pétrole); les micelles se dispersent par répulsion électrostatique et donc sont mises en suspension dans l'eau; puis elles sont ensuite dispersées par les courants marins.

8 Dans l'expérience 5, il est très difficile de récupérer l'huile à la petite cuillère; tout comme il est difficile de récupérer directement du pétrole sur la surface des mers. Il est donc préférable d'avoir recours aux agents dispersants.

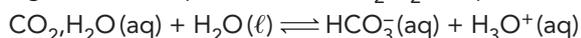
4 Le système des carbonates dans les océans (p. 21)

Matériel et produits

- Un pH-mètre;
- de l'eau minérale gazeuse et de l'eau non gazeuse;
- deux béchers de 200 mL;
- deux béchers de 100 mL;
- un erlenmeyer de 250 mL;
- un entonnoir tulipe comprenant un robinet avec bouchon et bulleur (voir le document 7, p. 21 du manuel);
- du carbonate de calcium solide;
- de l'acide chlorhydrique à 5 mol·L⁻¹;
- du bleu de bromothymol;
- des éprouvettes graduées de 20 mL;
- de l'eau de chaux fraîche;
- une balance;
- un tube à essais;
- une solution de tampon carbonate (voir préparation de la question 6, p. 21 du manuel);
- une solution de soude de pH égal à celui du tampon carbonate.



2 a. Le dioxyde de carbone gazeux se dissout et réagit avec l'eau pour donner $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$. Puis :

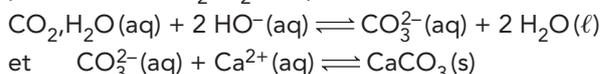


b. Lorsque du dioxyde de carbone est dissous dans l'eau, il réagit en produisant des ions oxonium : le pH diminue (expérience 2 : pour l'eau du robinet $\text{pH}_{\text{initial}} = 7,85$ et $\text{pH}_{\text{final}} = 6,55$).

c. De même, le dioxyde de carbone atmosphérique peut se dissoudre dans l'eau des mers, des océans,

des lacs, des rivières, etc. (hydrosphère) et ainsi les acidifier.

3 a. Il s'agit d'exploiter l'expérience 3 : le dioxyde de carbone gazeux se dissout et réagit avec l'eau pour donner $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$.



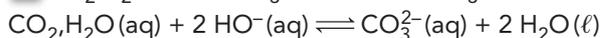
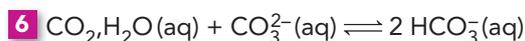
b. Le dioxyde de carbone dissous peut réagir avec les ions présents dans la lithosphère pour donner du carbonate de calcium solide, c'est-à-dire du « calcaire ».



b. L'excès de dioxyde de carbone consomme les ions carbonate, le précipité de carbonate de calcium se dissout et il se forme des ions hydrogénocarbonate. Ceux-ci ne précipitent pas avec les ions calcium : le trouble de l'eau de chaux disparaît.

5 Une solution tampon est une solution dont le pH varie peu par ajout modéré d'eau, d'acide ou de base.

pH	Solution tampon	Soude
pH initial	9,60	9,60
pH final	9,58	6,60



Dans le cas de la soude, des ions hydroxyde sont consommés : le pH diminue.

Dans le cas du tampon carbonate, une base réagit avec un acide pour former l'espèce amphotère : le pH varie peu.

2 Un traceur d'eaux souterraines (p. 24)

Les eaux souterraines ne contiennent plus que 38 % du nombre de noyaux de départ, N_0 . Ainsi :

$$N(t) = \frac{38}{100} \cdot N_0$$

soit : $N(t) = 0,38 \cdot N_0$ (1)

La loi de décroissance radioactive s'écrit $N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$

or : $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$

ainsi : $N(t) = N_0 \cdot e^{-\left(\ln 2 \cdot \frac{t}{t_{1/2}}\right)}$

il en résulte : $\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\left(\ln 2 \cdot \frac{t}{t_{1/2}}\right)}$ (2)

Les expressions (1) et (2) conduisent à :

$$e^{-\left(\ln 2 \cdot \frac{t}{t_{1/2}}\right)} = 0,38$$

$$\ln\left(e^{-\left(\ln 2 \cdot \frac{t}{t_{1/2}}\right)}\right) = \ln(0,38)$$

soit : $-\ln 2 \times \frac{t}{t_{1/2}} = \ln(0,38)$

d'où : $t = -\frac{\ln(0,38)}{\ln 2} \times t_{1/2} = -\frac{\ln(0,38)}{\ln 2} \times 3,01 \times 10^5$
 $= 4,2 \times 10^5$ ans.

Les eaux souterraines ont un temps de résidence estimé à $4,2 \times 10^5$ ans.

3 Le carbone 14 (^{14}C) : un traceur océanique (p. 25)

■ Le document 1 permet de comprendre que le traceur évoqué est d'origine radioactive, c'est-à-dire qu'il se désintègre de façon aléatoire au cours du temps.

■ Le document 2 précise que si le traceur ^{14}C reste en contact avec l'atmosphère, sa quantité reste constante, car sa disparition est compensée par la production de ^{14}C dans l'atmosphère. En revanche, s'il est isolé de l'atmosphère (donc, dissous dans l'océan), sa quantité diminue selon une fonction du temps.

■ Les documents 3 et 4 montrent, d'une part, que la mesure de la quantité de ^{14}C restant à une profondeur donnée permet d'évaluer le temps de séjour de ce traceur dans l'océan et, d'autre part, qu'en profondeur le courant connaît une circulation caractérisée par sa lenteur. Il faut bien comprendre, pour

résoudre ce problème, que l'eau qui remonte le Pacifique Nord est la même que celle qui est descendue de l'Atlantique Nord voici plusieurs centaines d'années, via la circulation thermohaline.

Pour évaluer l'ordre de grandeur de la vitesse moyenne de la circulation océanique profonde, il faut exploiter le document montrant l'âge des eaux profondes à 3000 m de profondeur et utiliser le fait que de l'Atlantique Nord au Pacifique Nord (soit un parcours d'environ 4×10^4 km), le traceur a mis 1700 ans environ.

$$\Delta t = 1700 \times 365 \times 24 \times 3600 = 5,4 \times 10^{10} \text{ s}$$

$$D = 4 \times 10^4 \text{ km} = 4 \times 10^7 \text{ m}$$

d'où :

$$v = \frac{D}{\Delta t} = \frac{4 \times 10^7}{5,4 \times 10^{10}} = 7,5 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 0,75 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1};$$

ordre de grandeur de v : $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

4 Le système des carbonates dans l'océan (1) (p. 26)

■ L'énoncé demande de prévoir si les coraux synthétiseront du carbonate de calcium, $\text{CaCO}_3(\text{s})$, en cas d'augmentation de la concentration en acide carbonique, $\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}(\text{aq})$, de l'eau de mer.

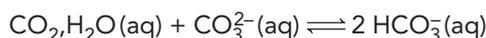
■ Pour cela, il convient d'écrire l'équation de la réaction qui a lieu entre l'acide carbonique et l'ion carbonate, puis de discuter des effets d'une augmentation de la concentration en acide carbonique.

■ Si $P_{\text{CO}_2}^{\text{atm}}$ augmente, alors $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]$ augmente dans les eaux froides.

Si $P_{\text{CO}_2}^{\text{atm}}$ augmente, Les eaux chaudes dégazent (rejetent) moins de dioxyde de carbone dans l'atmosphère.

Ainsi, dans tous les océans, $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]$ augmente. Les océans stockent donc le dioxyde de carbone.

L'acide carbonique en excès réagit avec les ions carbonate, $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$, selon la réaction d'équation :



La concentration en ions carbonate $[\text{CO}_3^{2-}]$ dans les océans diminue. Comme la concentration en ions calcium, $[\text{Ca}^{2+}]$, est constante, le produit $[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}]$ peut devenir inférieur à $4,47 \times 10^{-7}$. Le solide $\text{CaCO}_3(\text{s})$ se détruit et la réaction se fait dans le sens de l'équation : $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq}) + \text{Ca}^{2+}(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{CaCO}_3(\text{s})$.

5 Le système des carbonates dans l'océan (2) (p. 26)

■ L'énoncé demande de déterminer si une augmentation de 50 % de $P_{\text{CO}_2}^{\text{atm}}$ a une influence sur le pH de l'océan.

■ Pour cela, il faut :

- déterminer les concentrations respectives des différentes espèces carbonées en utilisant les expressions des constantes K_{A_1} et K_{A_2} , ainsi que celles entre la concentration $[\text{CO}_2^{\text{océan}}]$ et $P_{\text{CO}_2}^{\text{océan}}$;
- en déduire la valeur du DIC ;
- calculer les nouvelles valeurs de $P_{\text{CO}_2}^{\text{océan}}$, DIC' et $[\text{CO}_2^{\text{océan}}]'$;
- donner l'expression du DIC' en fonction de $[\text{CO}_2^{\text{océan}}]'$ et $[\text{H}_3\text{O}^+]'$;
- résoudre l'équation du second degré en $[\text{H}_3\text{O}^+]'$.

■ D'après le document 2, à $\text{pH}^{\text{océan}} = 8,0$: l'espèce majoritaire est HCO_3^- .

$$[\text{CO}_2^{\text{océan}}] = \alpha \times P_{\text{CO}_2}^{\text{océan}} = 2,803 \times 10^{-2} \times 3,80 \times 10^{-4} = 1,07 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{K_{A_1} \times [\text{CO}_2^{\text{océan}}]}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{1,392 \times 10^{-6} \times 1,07 \times 10^{-5}}{10^{-8,0}} = 1,48 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{K_{A_2} \times [\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_3\text{O}^+]} = \frac{1,189 \times 10^{-9} \times 1,48 \times 10^{-3}}{10^{-8,0}} = 1,76 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{DIC} &= [\text{CO}_2^{\text{océan}}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \\ &= 1,07 \times 10^{-5} + 1,48 \times 10^{-3} + 1,76 \times 10^{-4} \\ &= 1,67 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{CO}_2}^{\text{océan}} &= P_{\text{CO}_2}^{\text{atm}} = 1,50 \times P_{\text{CO}_2}^{\text{atm}} \\ &= 1,50 \times 3,80 \times 10^{-4} = 5,70 \times 10^{-4} \text{ bar.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{DIC}' &= 1,05 \times \text{DIC} = 1,05 \times 1,67 \times 10^{-3} \\ &= 1,75 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{CO}_2^{\text{océan}}]' &= \alpha \times P_{\text{CO}_2}^{\text{océan}} \\ &= 2,803 \times 10^{-2} \times 5,70 \times 10^{-4} \\ &= 1,60 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{DIC}' &= [\text{CO}_2^{\text{océan}}]' + [\text{HCO}_3^-]' + [\text{CO}_3^{2-}]' \\ &= [\text{CO}_2^{\text{océan}}]' + \frac{K_{A_1} \cdot [\text{CO}_2^{\text{océan}}]'}{[\text{H}_3\text{O}^+]} + \frac{K_{A_1} \cdot K_{A_2} \cdot [\text{CO}_2^{\text{océan}}]'}{[\text{H}_3\text{O}^+]^2} \end{aligned}$$

• Ainsi, on peut écrire une équation du second degré en $[\text{H}_3\text{O}^+]'$:

$$\left(1 - \frac{\text{DIC}'}{[\text{CO}_2^{\text{océan}}]'}\right) \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]'^2 + K_{A_1} \cdot [\text{H}_3\text{O}^+]' + K_{A_1} \cdot K_{A_2} = 0$$

$$\Leftrightarrow \left(1 - \frac{1,75 \times 10^{-3}}{1,60 \times 10^{-5}}\right) \times [\text{H}_3\text{O}^+]'^2 + 1,392 \times 10^{-6} \times [\text{H}_3\text{O}^+]' + 1,392 \times 10^{-6} \times 1,189 \times 10^{-9} = 0$$

$$\Leftrightarrow -109 \times [\text{H}_3\text{O}^+]'^2 + 1,392 \times 10^{-6} \times [\text{H}_3\text{O}^+]' + 1,655 \times 10^{-15} = 0$$

• En résolvant cette équation, on trouve :

$$\begin{aligned} [\text{H}_3\text{O}^+]' &= 1,39 \times 10^{-8} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \\ \text{pH}' &= 7,9 \end{aligned}$$

L'océan s'acidifie un peu.

6 L'acide nitrique des pluies (p. 27)

■ L'énoncé demande de déterminer si, dans une eau de pluie, le carbonate de zinc peut se former.

■ Pour cela, il faut exploiter les relations données au document 5, c'est-à-dire pour un $\text{pH} = 5,6$ et une concentration $[\text{Zn}^{2+}] = 0,4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$:

1. montrer que $[\text{CO}_3^{2-}] = 3,24 \times 10^{-6} \times [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]$;
2. montrer qu'il y a précipitation du carbonate de zinc si $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] \geq 7,7 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et exploiter le document 1 pour conclure ;
3. interpréter le document 3.

$$\begin{aligned} \text{1. } [\text{CO}_3^{2-}] &= \frac{K_{A_1} \times K_{A_2} \times [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]}{[\text{H}_3\text{O}^+]^2} \\ &= \frac{4,27 \times 10^{-7} \times 4,79 \times 10^{-11}}{(10^{-5,6})^2} \times [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] \\ \Leftrightarrow [\text{CO}_3^{2-}] &= 3,24 \times 10^{-6} \times [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] \end{aligned}$$

2. Le document 5 indique qu'en cas de précipitation :

$$[\text{Zn}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] \geq 1,0 \times 10^{-11}$$

$$\text{soit : } [\text{CO}_3^{2-}] \geq \frac{1,0 \times 10^{-11}}{0,4} = 2,5 \times 10^{-11} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\Leftrightarrow 3,24 \times 10^{-6} \times [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] \geq 2,5 \times 10^{-11} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$\Leftrightarrow [\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}] \geq \frac{2,5 \times 10^{-11}}{3,24 \times 10^{-6}} = 7,7 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Le document 1 explique que la concentration $[\text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}]$ dans une eau de pluie est environ égale à $1,2 \times 10^{-5} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Or, $1,2 \times 10^{-5} > 7,7 \times 10^{-6}$: il y a donc précipitation du carbonate de zinc.

3. Les documents 3 et 4 montrent qu'en présence de carbonate de zinc (zinc « vieux »), les ions oxonium présents dans un acide ne réagissent quasiment pas avec le zinc ; d'où la longévité des gouttières.

7 La pollution au plomb (p. 28)

■ L'énoncé demande de déterminer la quantité minimale de terre ou de plante à ingérer pour qu'un enfant ou un adulte soit intoxiqué.

■ Pour cela :

1. écrire la loi de Beer-Lambert pour l'émission ;

2. calculer les concentrations en plomb dans la terre et dans la plante, puis en déduire le facteur de déconcentration dans les plantes étudiées ;

3. déterminer la masse minimale de terre pour qu'un enfant ou un adulte soit contaminé.

■ 1. La loi de Beer-Lambert, pour l'élément plomb, s'écrit :

$$I = k \cdot [\text{Pb}]$$

2. • $[\text{Pb}]^{\text{terre}} = \frac{I^{\text{terre}}}{k} = \frac{1\,115\,960}{9\,200} = 121,3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

(121,3 mg de plomb par litre de solution).

L'échantillon de 1 g de terre a été dissous dans 20 mL de solution, donc :

$$[\text{Pb}]^{\text{terre}} = 121,3 \times 20 \times 10^{-3} = 2,426 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$$

(2,426 mg de plomb par gramme de terre).

• $[\text{Pb}]^{\text{plante}} = \frac{I^{\text{plante}}}{k} = \frac{115\,000}{9\,200} = 12,50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

(12,50 mg de plomb par litre de solution).

L'échantillon de 1 g de plante a été dissous dans 40 mL de solution, donc :

$$[\text{Pb}]^{\text{plante}} = 12,50 \times 40 \times 10^{-3} = 0,500 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$$

(0,500 mg de plomb par gramme de plante).

• Facteur de déconcentration :

$$F = \frac{[\text{Pb}]^{\text{plante}}}{[\text{Pb}]^{\text{terre}}} = \frac{0,500}{2,426} = 0,206 = 20,6 \%$$

Près de 21% du plomb de la terre passe dans la plante.

3. • Il faut exploiter le seuil légal de danger donné dans le texte et les taux de transfert dans le sang.

• Enfant

$$m_{\text{terre}} = \left(\frac{100 \times 10^{-6} \times 3}{0,50} \right) \times \left(\frac{1}{2,426 \times 10^{-3}} \right)$$

$$= 0,25 \text{ g};$$

$$m_{\text{plante}} = \left(\frac{100 \times 10^{-6} \times 3}{0,50} \right) \times \left(\frac{1}{0,500 \times 10^{-3}} \right)$$

$$= 1,2 \text{ g}.$$

Pour 50% de transfert (taux de transfert maximal) dans le sang, on a 0,25 g de terre et 1,2 g de plante.

• Adulte

$$m'_{\text{terre}} = \left(\frac{100 \times 10^{-6} \times 5}{0,10} \right) \times \left(\frac{1}{2,426 \times 10^{-3}} \right)$$

$$= 2,1 \text{ g};$$

$$m'_{\text{plante}} = \left(\frac{100 \times 10^{-6} \times 5}{0,10} \right) \times \left(\frac{1}{0,500 \times 10^{-3}} \right)$$

$$= 10 \text{ g}.$$

Pour 10 % de transfert (taux de transfert maximal) dans le sang, on a 2,1 g de terre et 10 g de plante.

Un enfant sera donc plus rapidement intoxiqué.

Eau et ressources

Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 L'eau douce sur Terre (p. 30)

1 a. Les eaux de surface peuvent naître de la fonte des glaciers, du ruissellement des pluies, de la résurgence des eaux souterraines.

$$\text{b. } V_{\text{lac Baïkal}} = 0,13 \times 0,20 = 0,026 \text{ million de km}^3 \\ = 2,6 \times 10^4 \text{ km}^3,$$

soit environ les 23 000 km³ annoncés en légende de la photographie du document 2.

2 Les ressources mondiales disponibles sont à elles seules insuffisantes pour alimenter les populations.

3 L'empreinte d'un état sur l'eau est le volume d'eau nécessaire pour la production des biens et des services consommés par ses habitants :

- 2 483 m³/personne/an aux États-Unis (696 × 10⁹ m³/an);
- 2 332 m³/personne/an en Italie (140 × 10⁹ m³/an);
- 1 875 m³/personne/an en France (110 × 10⁹ m³/an);
- 1 682 m³/personne/an en Suisse (12 × 10⁹ m³/an);
- 1 103 m³/personne/an en Pologne (43 × 10⁹ m³/an);

– 675 m³/personne/an en Éthiopie (43 × 10⁹ m³/an); La moyenne mondiale est de 1 243 m³/personne/an (7 452 × 10⁹ m³/an).

4 Bilan Soit V , le volume à évaluer.

$V = 1\,400 \times 0,03 \times 0,26 = 11$ millions de km³ environ (volume évalué à 9,5 millions de km³ dans le document 2).

D'après la question 3, la consommation mondiale est voisine de 7 500 × 10⁹ m³/an, c'est-à-dire 7 500 km³/an. En l'absence de renouvellement de ces eaux et pour la seule consommation, 1 500 années de ressources seraient *a priori* disponibles.

Ces réserves ne suffisent pas, car elles sont inégalement réparties puisque 26 pays reçoivent moins de 1 000 m³ d'eau par an et par habitant.

L'une des principales conséquences se situe dans la désertification des pays. Les ressources alimentaires agricoles, directement dépendantes de l'eau, sont particulièrement exposées.

2 De l'eau salée à l'eau potable (p. 31)

1 Une eau salée contient des « sels » dissous (chlorure de sodium, sulfate de magnésium, etc.) et pas seulement du « sel » (chlorure de sodium).

Une eau saumâtre est une eau salée, mais de concentration inférieure à celle de l'eau de mer (donc généralement comprise entre 1 et 10 g · L⁻¹).

2 a. Pour comprendre la nécessité de réduire la pression dans l'effet ($n + 1$), il faut regarder le document 3 qui donne l'évolution de la température d'ébullition de l'eau en fonction de la pression. Lorsque la pression diminue, la température d'ébullition diminue aussi : l'eau s'évapore à une température plus basse.

b. La vapeur produite dans le premier effet se condense pour produire de l'eau douce dans le deuxième effet où règne une pression inférieure.

c. L'énergie thermique est cédée au milieu extérieur lors d'une condensation.

d. Le procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80 °C. Dans le premier effet, l'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange. L'énergie thermique transférée au travers de cette surface est apportée par la vapeur produite par la chaudière. L'énergie qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le deuxième effet (et ainsi de suite).

Seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique.

3 L'eau de mer est chauffée par la vapeur dans une chaudière à saumure. Elle est maintenue sous pression pendant le chauffage. Vers une température de l'ordre de 120 °C, l'eau est introduite dans une

enceinte où règne une pression réduite. L'eau se vaporise instantanément par détente, appelée *flash*. La fraction de l'eau évaporée se recondense sur des tubes et l'eau liquide est recueillie. Dans le procédé de distillation à détentes étagées (ou MSF pour *Multi-Stage Flash distillation*), l'évaporation et la condensation sont répétées par détentes successives

dans des chambres à pressions de plus en plus réduites.

4 Bilan L'homme a besoin de sels minéraux pour vivre. S'il ne buvait que de l'eau pure (sans sels dissous), des phénomènes d'osmose viendraient appauvrir l'organisme en ions dissous.

3 Production d'eau potable et écologie (p. 32)

1 a. Les risques majeurs sont les modifications (voire la disparition) de la faune et de la flore marines.

b. • Procédé d'osmose inverse

– La saumure est deux fois plus concentrée en sel que l'eau de mer : $C_{\text{saumure}} = 38 \times 2 = 76 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

– 1 m³ de saumure est rejetée par m³ d'eau douce produite :

$m_{\text{saumure}} = 7,6 \times 10^4 \text{ g}$ (76 kg) rejetée par m³ d'eau douce produite.

• Procédé de distillation

– La saumure est 10 à 15 fois plus concentrée en sel que l'eau de mer : $380 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} < C_{\text{saumure}} < 570 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

– 9 m³ de saumure sont rejetés par m³ d'eau douce produite :

$380 \times 10^3 \times 9 < m_{\text{saumure}} < 570 \times 10^3 \times 9 \text{ g}$ rejetée par m³ d'eau douce produite

$3,4 \times 10^6 \text{ g} < m_{\text{saumure}} < 5,1 \times 10^6 \text{ g}$

$3,4 \text{ tonnes} < m_{\text{saumure}} < 5,1 \text{ tonnes}$.

Le procédé d'osmose inverse est celui qui affecte le moins l'écosystème par les rejets en saumure.

c. Les rejets contiennent des résidus chimiques qui polluent les eaux.

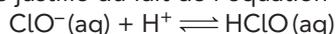
2 Bilan Les usines de dessalement par distillation génèrent des rejets en saumure plus élevés, leur consommation énergétique est plus grande, elles consomment des énergies fossiles et rejettent des gaz à effet de serre.

4 Le traitement des eaux (p. 33)

1 a. L'adsorption est le phénomène par lequel des molécules (adsorbats) se fixent sur une surface solide (adsorbant).

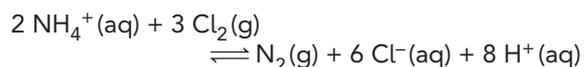
b. Selon la taille des pores des membranes utilisées, des molécules de tailles différentes seront retenues.

2 a. Elle se justifie du fait de l'équation suivante :



b. $\text{Cl}_2(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\ell) \rightleftharpoons \text{HClO}(\text{aq}) + \text{Cl}^{-}(\text{aq}) + \text{H}^{+}(\text{aq})$

3 $2 \text{NH}_4^{+}(\text{aq}) + 3 \text{O}_3(\text{g}) \rightleftharpoons \text{N}_2(\text{g}) + 3 \text{O}_2(\text{g}) + 3 \text{H}_2\text{O}(\ell) + 2 \text{H}^{+}(\text{aq})$



4 Bilan a. Les traitements subis par une eau brute sont le dégrillage, le tamisage, la floculation, la décantation, la filtration, l'ozonation et la chloration.

b. Les normes européennes de potabilité peuvent être recherchées à partir des liens ci-dessous (voir complément ci-dessous).

Complément

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique :

- <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT00000465574&dateTexte=&categorieLien=id>
- <http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI000006686387&cidTexte=LEGITEXT000006072665&dateTexte=20100825&fastPos=5&fastReqId=59829070&oldAction=rechCodeArticle>
- <http://www.sante.gouv.fr/resultats-du-controle-sanitaire-de-la-qualite-de-l-eau-potable.html>

5 Métaux : polluants ou ressources minérales ? (p. 34)

1 a. La pollution par les métaux lourds peut être due aux rejets des fonderies de la métallurgie et des incinérateurs d'ordures, ainsi qu'aux installations minières abandonnées. Les pluies entraînent les métaux dans les océans par lessivage.

b. • Arrêté du 25 janvier 2010 relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement :

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021865356>

Nom de la substance	CODE SANDRE	NQE MOYENNE annuelle ($\mu\text{g} / \text{L}$)*
Arsenic dissous	1369	4,2
Chrome dissous	1389	3,4
Cuivre dissous	1392	1,4
Zinc dissous	1383	Dureté inférieure ou égale à 24 mg CaCO_3/L : 3,1
		Dureté supérieure à 24 mg CaCO_3/L : 7,8

* Ces normes ont un caractère provisoire car elles ne correspondent pas pleinement à la définition d'une NQE. Ces valeurs ne sont protectrices que pour les organismes de la colonne d'eau et ne prennent notamment pas en compte l'intoxication secondaire.

• Arrêté du 11 janvier 2007 (publié le 06 février 2007) relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique

<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000465574&dateTexte=&categorieLien=id>

PARAMÈTRES	LIMITES DE QUALITÉ	UNITÉS	NOTES
Cadmium	5,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	
Chrome	50	$\mu\text{g}/\text{L}$	
Cuivre	2,0	mg/L	
Mercurure	1,0	$\mu\text{g}/\text{L}$	
Nickel	20	$\mu\text{g}/\text{L}$	
Plomb	10	$\mu\text{g}/\text{L}$	La limite de qualité est fixée à 25 $\mu\text{g}/\text{L}$ jusqu'au 25 décembre 2013. Les mesures appropriées pour réduire progressivement la concentration en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine au cours de la période nécessaire pour se conformer à la limite de qualité de 10 $\mu\text{g}/\text{L}$ sont précisées aux articles R. 1321-55 et R. 1321-49 (arrêté d'application). Lors de la mise en œuvre des mesures destinées à atteindre cette valeur, la priorité est donnée aux cas où les concentrations en plomb dans les eaux destinées à la consommation humaine sont les plus élevées.

2 a.

Métal	Masse (million de tonnes)
Mn	0,44
Fe	0,09
Ni	0,020
Cu	0,019

Métal	Masse (million de tonnes)
Co	0,0038
Ti	0,009
Al	0,044

b. Source : <http://wwz.ifremer.fr/drogm/Ressources-minerales/Nodules-polymetalliques/Environnement>

« Les engins de ramassage progressant sur les fonds marins pour récupérer les nodules laissent derrière eux une trace assez importante due à la remobilisation de la partie supérieure des sédiments. En même temps, au fur et à mesure qu'ils progressent, ils produisent un nuage de sédiments en suspension. Dépendant du régime des courants de fonds, ce nuage pourra se déposer plus ou moins loin de l'engin et recouvrir toutes les formes de vie sur le fond. D'autres impacts d'exploitation tels le bruit des machines, les pertes de carburant et bien d'autres accidents peuvent aussi intervenir.

Ces impacts auront comme conséquences la destruction physique et la perturbation du benthos, l'augmentation de la demande d'oxygène, la destruction ou le changement dans la chaîne alimentaire, l'assimilation de substances dangereuses par les organismes. Les engins de ramassage, mis au point de nos jours, sont prévus pour collecter les nodules sur les fonds marins, les concasser et les remonter en surface sous la forme de pulpe au travers d'une conduite principale à l'aide d'un ensemble de pompes hélico-centrifuges.

Cette pulpe, au départ très liquide, est décantée sur la plate-forme. L'excès d'eau, riche en particules, est rejeté à la mer.

Les particules ainsi rejetées formeront un nuage qui aura comme conséquence la perturbation du benthos, plancton et necton, l'atténuation de la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, la réduction possible de la quantité d'oxygène, la destruction ou changement de la chaîne alimentaire.

Il peut arriver que le transfert du concentré de nodules des plateformes aux navires minéraliers et leur transport vers la zone industrielle s'effectuent avec la perte d'une partie du concentré. Le bruit des machines et bien d'autres accidents peuvent aussi intervenir. Les conséquences de ces types d'impact pourront avoir comme effet la destruction physique et perturbation du benthos, plancton et necton, l'atténuation de la lumière due à la présence d'un nuage de sédiments, la réduction possible de la quantité d'oxygène, l'augmentation de la demande d'oxygène, la destruction ou changement d'une partie de la chaîne alimentaire, l'assimilation de substances dangereuses par les organismes, la bioaccumulation de résidus toxiques.

Lorsque les nodules polymétalliques sont exploités, ils passent par un processus de traitement industriel qui a pour but d'extraire les métaux d'intérêt économique : le cuivre, le nickel, le cobalt et le manganèse. Parmi les nombreux procédés métallurgiques étudiés dans ce but, la lixiviation sulfurique (hydrométallurgie) et la fusion (pyrométallurgie) ont été retenues. Chacun de ces procédés comporte une première phase de concentration, une deuxième phase de raffinage et une troisième et dernière phase de fabrication d'alliages ferro-manganésifères.

Le déroulement de chacune de ces phases peut être accompagné par la production d'une quantité considérable de résidus solides, liquides ou gazeux, qui pourront être à l'origine de problèmes sur l'environnement. »

3 Bilan Ils peuvent être à l'origine de nombreuses pollutions, mais peuvent aussi représenter des ressources minières économiquement très importantes.

6 Les hydrates de gaz, ressources du futur (p. 35)

1 Un clathrate, du grec *klathron*, signifie « fermeture ». Ils sont nommés ainsi, car ce sont des complexes d'inclusion de molécules.

2 Entre les molécules d'eau s'établissent des liaisons hydrogène et des liaisons de van der Waals entre les molécules d'eau et de méthane.

Complément

Pour aller plus loin :

http://www.neutron-sciences.org/index.php?option=com_article&access=standard&Itemid=129&url=/articles/sfn/pdf/2010/01/sfn2010013.pdf

3 a. Aux température et pression données, un clathrate est dit « métastable », car la transformation vers l'état stable (décomposition) est extrêmement lente (non observable).

b. Une baisse du niveau marin conduirait à une modification de la pression et donc à la décomposition des hydrates de gaz.

c. L'augmentation de la température aurait les mêmes conséquences qu'une variation de pression.

d. La libération de méthane induirait une augmentation de l'effet de serre.

$$\begin{aligned} \mathbf{4} \quad V_{\text{hydrate}} &= 20 \text{ millions de km}^3 = 20 \times 10^6 \text{ km}^3 \\ &= 20 \times 10^{15} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$V_{\text{méthane}} = 160 \cdot V_{\text{hydrate}} = 3,2 \times 10^{18} \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} V_{\text{consommé}} &= 3000 \text{ milliards de m}^3/\text{an} \\ &= 3,0 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{an} \end{aligned}$$

$$\frac{V_{\text{méthane}}}{V_{\text{consommé}}} = 10^6 \text{ années de ressources}$$

Pratique expérimentale

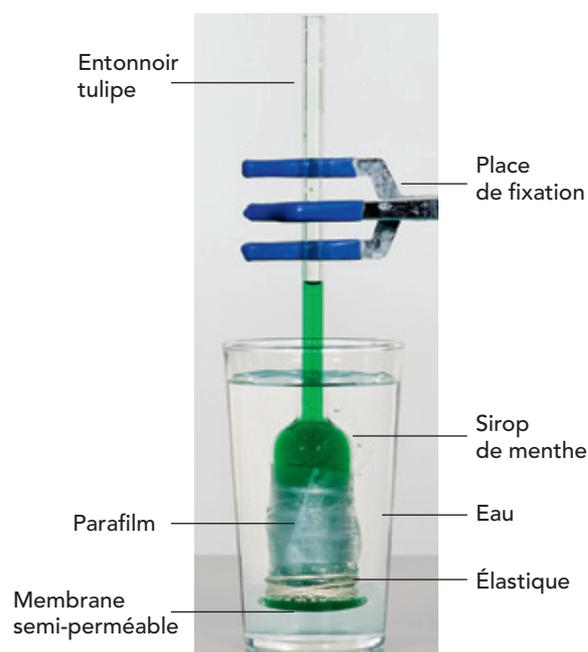
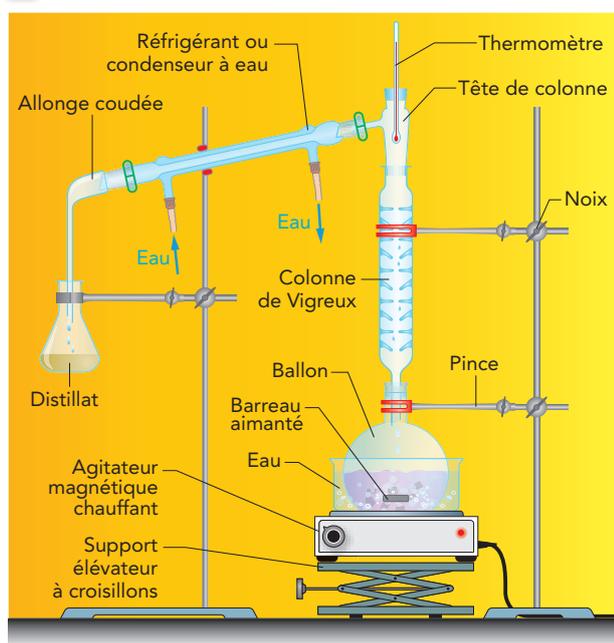
1 L'eau : des océans au robinet (p. 36)

Matériel et produits

- De l'eau salée à $38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de nitrate d'argent à $0,010 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, un test de flamme, du sulfate de cuivre anhydre ;
- du sirop de menthe ;
- une éprouvette de 100 mL ;
- un montage à distillation fractionnée ;
- un agitateur magnétique chauffant et un barreau aimanté ;

- un entonnoir tulipe ;
- une pince, une noix et un support (voir document 3, p. 36 du manuel) ;
- du parafilm et un élastique ;
- un film pour confiture (membrane semi-perméable) ;
- un verre.

1



2 La distillation permet d'obtenir de l'eau pure à partir d'eau salée : c'est une des méthodes mises en œuvre dans le dessalement de l'eau de mer. Le distillat est de l'eau pure et le résidu est une saumure très concentrée.

Pour l'osmose : le niveau monte dans le tube de l'entonnoir, ce qui signifie que de l'eau entre à l'intérieur du dispositif. Au niveau de la membrane semi-perméable, la pression dans l'eau est supérieure à la pression du sirop de menthe : ceci est modélisé par la pression osmotique ; l'eau va pénétrer dans l'entonnoir jusqu'à l'équilibre des pressions. L'eau se déplace du milieu le moins concentré en soluté vers le plus concentré : c'est le principe de l'osmose.

Dans le dessalement de l'eau de mer, on utilise l'osmose inverse qui consiste à exercer une pression supplémentaire, supérieure à la pression osmotique, du côté de l'eau salée de façon à ce que l'eau se déplace du milieu le plus concentré vers le moins concentré.

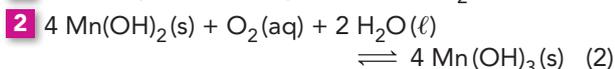
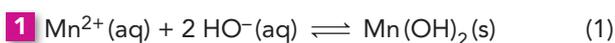
Remarque : les températures du sirop de menthe et de l'eau contenue dans le verre doivent être proches, car des différences de température peuvent avoir une influence sur le niveau du sirop dans le tube de l'entonnoir, en raison des phénomènes de dilatation ou de contraction, et fausser le résultat.

2 Le dosage du dioxygène dissous (p. 37)

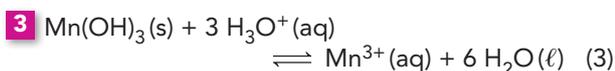
Matériel et produits

- Un erlenmeyer de 250 mL avec bouchon ;
- un cristalliseur ;
- une balance ;
- un erlenmeyer de 400 mL avec bouchon ;
- une éprouvette graduée de 10 mL ;
- un erlenmeyer de 100 mL ;
- une burette graduée ;
- un agitateur magnétique et un barreau aimanté ;
- du chlorure de manganèse solide ;
- des pastilles d'hydroxyde de sodium ;
- de la pierre ponce ;
- de l'acide sulfurique concentré ;
- de l'iodure de potassium solide ;
- une solution aqueuse de thiosulfate de sodium à $5,00 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de l'empois d'amidon ou du thiodène.

A Réactions

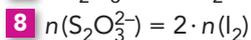
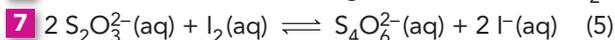


B Titrage



5 Dans la réaction (2), une mole de dioxygène dissous produit 4 moles d'hydroxyde de manganèse (III) qui produisent à leur tour 4 moles d'ions manganèse (III) dans la réaction (3), donc :

$$n(\text{Mn}^{3+}) = 4 \cdot n(\text{O}_2)$$



9 En combinant les réponses aux questions 5, 6 et 8 il vient :

$$n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = 4 \cdot n(\text{O}_2)$$

On a donc : $n(\text{O}_2) = \frac{1}{4} \cdot n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) = \frac{1}{4} \cdot C_1 \cdot V_1$

10 En négligeant le volume d'acide sulfurique ajouté, on a pour $V_1 = 13,5 \text{ mL}$:

$$\begin{aligned} [\text{O}_2] &= \frac{n(\text{O}_2)}{V_0} = \frac{0,25 \times 5,00 \times 10^{-3} \times 13,5 \times 10^{-3}}{50,0 \times 10^{-3}} \\ &= 3,38 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \\ &= 10,8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \approx 11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

Remarque : l'ajout de 10 mL d'acide sulfurique dilue la solution. Dans l'erlenmeyer initial de 250 mL, on a introduit environ 310 mL d'eau ; la concentration réelle, $[\text{O}_2]_{\text{réelle}}$, en dioxygène est donc égale

$$\text{à } [\text{O}_2]_{\text{réelle}} = [\text{O}_2] \times \frac{310 + 10}{310} = 1,03 \cdot [\text{O}_2].$$

L'erreur commise est donc de 3 %, d'où l'arrondi effectué plus haut.

Il nous a semblé qu'il était préférable, dans un premier temps, de passer sous silence cette erreur, car les équations sont déjà très nombreuses. Il est toujours possible ensuite de faire réfléchir les élèves sur ce point.

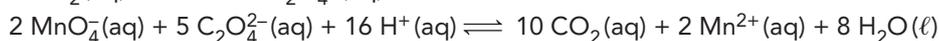
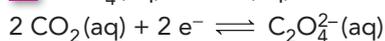
11 L'eau du robinet dosée est de qualité « excellente ».

3 L'indice permanganate (p. 38)

Matériel et produits

- Un erlenmeyer de 250 mL ;
- un réfrigérant à air ;
- une fiole jaugée de 100,0 mL ;
- une éprouvette graduée de 20 mL ;
- un agitateur magnétique chauffant et un barreau aimanté ;
- des pipettes jaugées de 20 mL avec propipettes ;
- une burette graduée ;
- un agitateur magnétique ;
- de l'acide sulfurique à $2,2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution aqueuse de permanganate de potassium à $2,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution aqueuse d'oxalate de sodium à $5,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Remarque : l'ébullition après l'ajout de la solution de permanganate de potassium doit être **très douce**.



2 a.

Étape 2 :

$2 \text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 5 \text{C}_2\text{O}_4^{2-}(\text{aq}) + 16 \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 10 \text{CO}_2(\text{aq}) + 2 \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 8 \text{H}_2\text{O}(\ell)$							
État initial	0	$n_1 - n_0$	n_2	excès	inutile*	inutile	excès
État final	x_f	$n_1 - n_0 - 2 x_f = 0$	$n_2 - 5 x_f$	excès	inutile	inutile	excès

* Le remplissage des cases ainsi repérées n'est pas nécessaire.

On obtient $x_f = \frac{1}{2}(n_1 - n_0)$ et $n(\text{C}_2\text{O}_4^{2-})_f = n_2 - \frac{5}{2}(n_1 - n_0)$

Étape 3 :

$2 \text{MnO}_4^-(\text{aq}) + 5 \text{C}_2\text{O}_4^{2-}(\text{aq}) + 16 \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 10 \text{CO}_2(\text{aq}) + 2 \text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 8 \text{H}_2\text{O}(\ell)$							
État initial	0	n_E	$n_2 - \frac{5}{2}(n_1 - n_0)$	excès	inutile	inutile	excès
État final : équivalence	x_E	$n_E - 2 x_E = 0$	$n_2 - \frac{5}{2}(n_1 - n_0) - 5 x_E = 0$	excès	inutile	inutile	excès

On obtient $x_E = \frac{1}{2}n_E$ et $x_E = \frac{1}{5}\left[n_2 - \frac{5}{2}(n_1 - n_0)\right]$

b. Par suite $\frac{1}{2}n_E = \frac{1}{5}\left[n_2 - \frac{5}{2}(n_1 - n_0)\right]$;

soit $\frac{5}{2}n_E = \left[n_2 - \frac{5}{2}(n_1 - n_0)\right]$

donc $n_E = \frac{2}{5}n_2 - n_1 + n_0$

$n_0 = n_1 - \frac{2}{5}n_2 + n_E$

c. $n_1 = C_1 \cdot V_1 = 2,0 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3}$
 $= 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$

$\frac{2}{5}n_2 = \frac{2}{5} \cdot C_2 \cdot V_2 = \frac{2}{5} \times 5,0 \times 10^{-3} \times 20,0 \times 10^{-3}$
 $= 4,0 \times 10^{-5} \text{ mol}$

Donc $n_0 = n_E$,

soit, si l'eau testée est l'eau du robinet et $V_E = 2,5 \text{ mL}$,

$n_0 = n_E = C_1 \cdot V_E = 2,0 \times 10^{-3} \times 2,5 \times 10^{-3}$
 $= 5,0 \times 10^{-6} \text{ mol}$

3 a. $n_e = 5 \cdot n_0$, car, dans la demi-équation redox relative au permanganate, une mole d'ions permanganate réagit avec 5 moles d'électrons.

$$n_e = 2,5 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

b. $n_{\text{ox}} = \frac{1}{2} \cdot n_e$ et $m_{\text{ox}} = M(\text{O}) \cdot n_{\text{ox}} = 16 \times \frac{1}{2} \times 2,5 \times 10^{-5}$
 $= 2,0 \times 10^{-4} \text{ g}$

c. L'indice permanganate est $\text{IP} = 10 \cdot m_{\text{ox}}$, car 100 mL d'eau ont été dosés et l'IP est donné pour un litre d'eau, d'où :

$$\text{IP} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} = 2,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

4 $\text{IP} < 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$: l'échantillon testé peut être consommé.

4 Titrage colorimétrique des ions chlorure (p. 39)

Matériel et produits

- Une solution aqueuse de chromate de potassium à $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution aqueuse de chromate de potassium à $5,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution aqueuse de nitrate d'argent à $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution aqueuse de chlorure de sodium à $1,0 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de l'eau Vichy St-Yorre;
- des tubes à essais;
- des béchers;
- des pipettes graduées;
- une burette graduée;
- un agitateur magnétique avec un barreau aimanté;
- une pipette jaugée de 10,0 mL avec propipette.

A Expériences préliminaires

1 Tube a : $2 \text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{CrO}_4^{2-}(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Ag}_2\text{CrO}_4(\text{s})$

Tube b : $\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{AgCl}(\text{s})$

2 Le précipité de chlorure d'argent se forme en premier. Si l'on continue à ajouter la solution de nitrate d'argent, la couleur du précipité de chromate d'argent apparaît : ce précipité se forme dans un deuxième temps.

3 Le précipité de chromate d'argent est le plus soluble dans l'eau.

4 Bécher A : les ions chlorure sont en excès ; bécher B : les ions argent sont en excès.

5 Dans le bécher A, il n'y a pas formation du précipité de chromate de potassium, alors qu'il se forme dans le bécher B. Il y a changement de couleur au changement de réactif limitant : les ions chromate peuvent servir d'indicateur de fin de réaction.

B Titrage dans une eau

6 Pour une prise d'essai de 10,0 mL, on trouve $V_E = 9,0$ mL.

7 $\text{Ag}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{AgCl}(\text{s})$

8 a. $[\text{Cl}^-] = 9,0 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

b. $t(\text{Cl}^-) = 3,2 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

c. Utiliser la fiche 3, « Évaluation des incertitudes de mesure », p. 198 du manuel.

d. C'est une eau minérale ; elle a donc des propriétés thérapeutiques et peut ne pas respecter certains critères de potabilité. Il est possible de la boire, mais il faut varier l'origine des eaux utilisées pour la boisson.

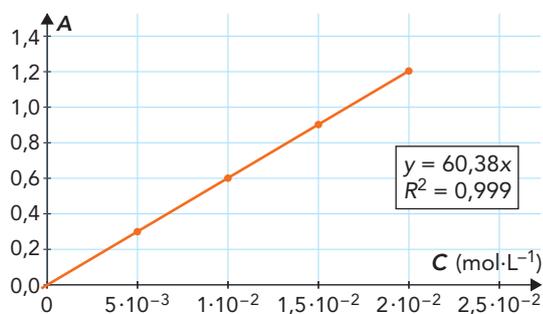
Résolution de problèmes scientifiques

2 Dosage spectrophotométrique des ions nitrate d'une eau (p. 42-43)

2 $2 \text{NO}_3^-(\text{aq}) + 3 \text{Cu}(\text{s}) + 8 \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 3 \text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{NO}(\text{g}) + 4 \text{H}_2\text{O}(\ell)$

■ $n(\text{Cu}^{2+})_{\text{formés}} = \frac{3}{2} \cdot n(\text{NO}_3^-)$

S_i	S_0	S_1	S_2	S_3
C_i ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	$2,0 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-2}$	$0,5 \times 10^{-2}$



Pour $A = 0,366$, on trouve $C = 6,1 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

$\text{Cu}^{2+}(\text{aq}) + 4 \text{NH}_3(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}(\text{aq})$

D'après l'équation :

$$[\text{Cu}^{2+}]_i = [\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}]_f = C$$

La quantité d'ions cuivre (II) formée est :

$$n(\text{Cu}^{2+})_{\text{formés}} = C \times V = 6,1 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-3} = 6,1 \times 10^{-4} \text{ mol.}$$

Donc :

$n(\text{NO}_3^-) = 2/3 \cdot n(\text{Cu}^{2+})_{\text{formés}} = 4,0 \times 10^{-4} \text{ mol}$ présents dans $V_0 = 5$ mL d'eau polluée.

Ainsi, $[\text{NO}_3^-] = 8,1 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} = 5,0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$.

La limite de qualité est fixée par le décret à $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$: l'eau n'est donc pas potable.

3 Les ions calcium et magnésium d'une eau minérale (p. 43)

■ L'énoncé demande de déterminer la somme des concentrations molaires à partir des indications fournies par le document 4.

■ Pour cela, il convient :

– d'exploiter les équations de réaction pour en déduire la relation entre $n_i(\text{Ca}^{2+}) + n_i(\text{Mg}^{2+})$ et $n_{\text{versé}}(\text{Y}^{4-})$ au changement de couleur ;

– d'en déduire $[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$;

– de comparer cette valeur à celle trouvée sur l'étiquette après avoir converti les concentrations massiques données sur l'étiquette, en concentrations molaires.

■ Au changement de couleur, la quantité d'EDTA versée et les quantités initiales d'ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont liées par $n_i(\text{Ca}^{2+}) + n_i(\text{Mg}^{2+}) = n_{\text{versé}}(\text{Y}^{4-})$.

En notant V_1 le volume de l'échantillon d'eau minérale, il vient :

$$[\text{Ca}^{2+}] \cdot V_1 + [\text{Mg}^{2+}] \cdot V_1 = [\text{Y}^{4-}] \cdot V_{2E} = C_2 \cdot V_{2E}$$

$$\begin{aligned} [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] &= C_2 \cdot \frac{V_{2E}}{V_1} \\ &= 5,0 \times 10^{-2} \times \frac{7,4}{20,0} \\ &= 1,9 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

Avec les indications de l'étiquette :

$$\begin{aligned} [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] &= \frac{t(\text{Ca}^{2+})}{M(\text{Ca})} + \frac{t(\text{Mg}^{2+})}{M(\text{Mg})} \\ &= \frac{549 \times 10^{-3}}{40,1} + \frac{119 \times 10^{-3}}{24,3} \\ &= 1,86 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \end{aligned}$$

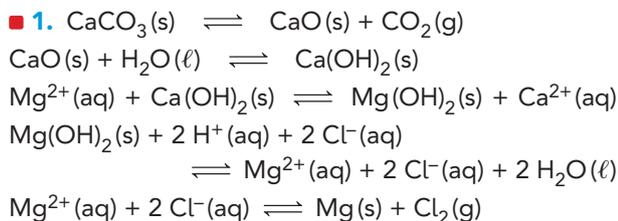
On observe un écart relatif de 2,2 %.

4 Recovery magnesium from sea water (p. 44)

■ L'énoncé demande de calculer la masse d'eau, puis de coquillages, c'est-à-dire de carbonate de calcium qu'il faut utiliser pour fabriquer une masse donnée de magnésium.

■ Pour cela, il faut :

– écrire les équations de toutes les réactions ;
– relier les quantités de matière de carbonate de calcium et d'ions magnésium à la quantité de magnésium produite.



2. Une mole de carbonate de calcium et une mole d'ions magnésium sont donc nécessaires pour fabriquer une mole de magnésium.

La quantité de magnésium produite par an est égale à :

$$n(\text{Mg}) = \left(\frac{7,5 \times 10^6 \times 10^6}{24,3} \right) = 3,1 \times 10^{11} \text{ mol}$$

Pour les coquillages : $n(\text{CaCO}_3) = 3,1 \times 10^{11} \text{ mol}$

$$m(\text{CaCO}_3) = 3,1 \times 10^{11} \times (40,1 + 12,0 + 3 \times 16,0)$$

$$= 3,1 \times 10^{13} \text{ g} = 3,1 \times 10^7 \text{ tonnes,}$$

c'est-à-dire 31 millions de tonnes.

Pour l'eau de mer : $m(\text{Mg}) = 7,5 \times 10^6 \text{ tonnes.}$

Le document 1 nous informe qu'il y a 6 million de tonnes de magnésium pour un volume d'eau de mer égal à $4,168\,181 \times 10^9 \text{ m}^3$. Ainsi :

$$4,168\,181 \times 10^9 \times \left(\frac{7,5 \times 10^6}{6 \times 10^6} \right) = 5 \times 10^9 \text{ m}^3,$$

c'est-à-dire 5 milliards de m^3 .

Remarque : l'Analyse et synthèse de documents scientifiques 1 du chapitre 1, p. 12, indique que les mers et les océans ont un volume estimé à 1 milliard de km^3 .

La totalité du magnésium ne peut pas être produite par ce procédé.

5 Adoucissement et dessalement (p. 45)

■ L'énoncé demande de déterminer la pression minimum à exercer pour adoucir l'eau de Las Cruces et dessaler l'eau de mer.

■ Pour cela, il faut :

- calculer la concentration en carbonate de calcium et celle en chlorure de sodium ;
- calculer les pressions osmotiques après avoir déterminé le coefficient de van't Hoff ;
- comparer la pression exercée à la somme de la pression osmotique et de la pression atmosphérique.

■ • Eau de Las Cruces :

- concentration en carbonate de calcium :

$$C = [\text{CaCO}_3] = \text{TH} \times 10 = 56 \times 10 = 5,6 \times 10^2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$C = \frac{5,6 \times 10^{-1}}{40,1 + 12,0 + 3 \times 16,0}$$

$$C = 5,6 \times 10^{-3} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

- pression osmotique :

$$\pi = i \cdot C \cdot R \cdot T = 2 \times 5,6 \times 10^{-3} \times 8,314 \times (27 + 273)$$

$$\pi = 28 \text{ kPa} = 0,28 \text{ atm.}$$

On exerce une pression $P = 8 \text{ atm} > (\pi + P^{\text{atm}})$, donc l'adoucissement est possible.

• Eau de mer :

- concentration en chlorure de sodium :

$$C = [\text{NaCl}] = \frac{35}{35,5 + 23,0} = 0,60 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

- pression osmotique :

$$\pi = i \cdot C \cdot R \cdot T = 2 \times 0,60 \times 8,314 \times (27 + 273)$$

$$\pi = 3,0 \times 10^3 \text{ kPa} = 30 \text{ atm.}$$

On exerce une pression $P = 8 \text{ atm} < (\pi + P^{\text{atm}})$, donc le dessalement n'est pas possible.

6 Les hydrates de méthane (p. 46)

■ L'énoncé demande de calculer le nombre de cages $5^{12}6^4$ présentes dans la structure II.

■ Pour cela, il faut exploiter le document 3 en comparant la surface des bandes relatives aux cages 5^{12} et $5^{12}6^4$.

■ La surface de la bande à 2910 cm^{-1} est 2 fois plus grande que celle à 2905 cm^{-1} , ce qui signifie que la structure II renferme deux fois plus de cages 5^{12} que de cages $5^{12}6^4$. La structure II comportant 16 cages 5^{12} , elle contient donc 8 cages $5^{12}6^4$.

7 Titration conductimétrique des ions sulfate (p. 46)

■ L'énoncé demande de calculer la concentration en ions sulfate de l'eau minérale et de la comparer à celle donnée par l'étiquette.

■ Pour cela, il faut :

- écrire l'équation de la réaction de précipitation ;
- établir la relation entre les quantités deréactifs à l'équivalence.



$$[\text{SO}_4^{2-}] \cdot V_1 = C_2 \cdot V_{2E}$$

$$\Leftrightarrow [\text{SO}_4^{2-}] = \frac{0,100 \times 12,1}{100,0} = 1,21 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 1,21 \times 10^{-2} \times (32,0 + 4 \times 16,0)$$

$$= 1,16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} = 1,16 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$$

On lit sur l'étiquette d'une bouteille d'eau de Contrexéville : « sulfate : $1187 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ».

L'écart relatif est donc de 2,1 %.

Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 Productions actuelles de dihydrogène (p. 48-49)

1 Le dihydrogène est une matière première importante de l'industrie chimique (production d'ammoniac, de méthanol, de médicaments, etc.), de l'industrie métallurgique et de la pétrochimie. Il est aussi utilisé dans les domaines de l'électronique ou du traitement des produits alimentaires.

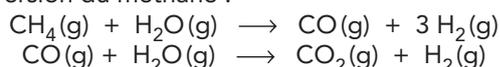
S'il devait être également utilisé pour produire de l'énergie, sa production devrait être augmentée et optimisée de manière à pouvoir le produire en quantités beaucoup plus importantes que les quantités actuelles.

2 Les 50 millions de tonnes de dihydrogène actuellement produites représenteraient 1,5 % de la demande mondiale d'énergie primaire. Si le dihydrogène devait être utilisé pour produire la totalité de l'énergie primaire actuellement nécessaire, il faudrait en synthétiser une masse M telle que :

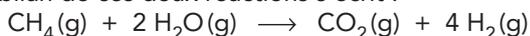
$$50 \times 10^6 = 0,015 M,$$

soit $M = \frac{50 \times 10^6}{0,015} = 3,3 \times 10^9$ tonnes de dihydrogène.

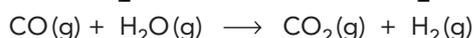
3 Équations des réactions mises en jeu lors de la conversion du méthane :



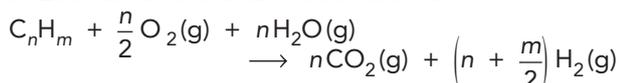
Le bilan de ces deux réactions s'écrit :



4 a. $\text{C}_n\text{H}_m + \frac{n}{2} \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow n \text{CO}(\text{g}) + \frac{m}{2} \text{H}_2(\text{g})$

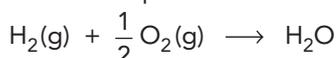


b. Le bilan de ces deux réactions s'écrit :



c. Les résidus lourds issus de la distillation du pétrole constituent une matière première peu coûteuse et abondante.

5 La réaction du dihydrogène avec le dioxygène se fait facilement selon l'équation :

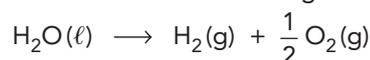


Elle libère de l'énergie et ne produit que de l'eau. En revanche, la production de dihydrogène se fait à partir de molécules hydrogénées telles que l'eau ou le méthane et nécessite de l'énergie.

En effet, la conversion du méthane en dihydrogène dont l'équation globale est donnée ci-après se fait à haute température et nécessite un apport important de chaleur et donc de l'énergie :



L'électrolyse de l'eau dont l'équation est donnée ci-après se fait lorsqu'un générateur électrique impose le passage d'un courant électrique dans une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium ou dans une membrane polymère échangeuse de protons. Cette opération est très coûteuse en énergie :

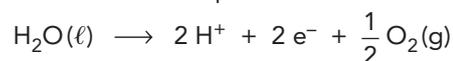


6 a. Les électrons assurent le passage du courant dans le circuit extérieur à l'électrolyseur et les électrodes.

b. Les ions H^+ assurent le passage du courant dans l'électrolyseur.

c. Le générateur impose le passage du courant dans l'électrolyseur et fournit l'énergie nécessaire à la réaction. La transformation d'énergie réalisée est la transformation d'énergie électrique en énergie chimique.

d. Réaction électrochimique à l'anode :



Réaction électrochimique à la cathode :



e. Actuellement, on utilise également des solutions aqueuses d'hydroxyde de potassium comme électrolyte.

f. Un normomètre cube, noté Nm^3 , est un volume de 1 m^3 mesuré dans les conditions normales de température et de pression : $P = 1,013 \text{ bar}$ et $T = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.

L'alimentation en eau de l'électrolyseur est de 1 litre d'eau par normomètre cube de dihydrogène produit, soit, d'après la loi du gaz parfait :

$$n(\text{H}_2) = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{1,013 \times 10^5 \times 1}{8,314 \times 273} = 44,6 \text{ mol.}$$

1 L d'eau liquide a une masse $m = 10^3 \text{ g}$ et contient

donc une quantité $n(\text{H}_2\text{O}) = \frac{m}{M}(\text{H}_2\text{O}) = 55,5 \text{ mol.}$

7 a. Stocker le dihydrogène sous pression permet de réduire le volume occupé par le dihydrogène.

b. Les transformations d'énergie réalisées à Vignola sont :

- des transformations d'énergie rayonnante en énergie électrique (panneaux solaires) ;
- des transformations d'énergie électrique en énergie chimique (électrolyseurs).

8 Bilan a. Les principaux modes de production du dihydrogène dans le monde sont la conversion du méthane (gaz naturel), l'oxydation partielle des hydrocarbures ou du charbon et, pour une très faible part, l'électrolyse de l'eau (voir document 5).

b. Du point de vue des produits formés, le procédé le plus écologique est l'électrolyse de l'eau puisque les autres procédés produisent du dioxyde de carbone avec le dihydrogène.

La nature du procédé ne suffit pas pour répondre à la question. En effet, se pose la question du mode de production de l'énergie électrique consommée lors de l'électrolyse.

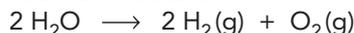
Si les procédés de conversion du méthane et d'oxydation partielle des hydrocarbures et du charbon s'accompagnent de la séquestration du dioxyde de carbone produit, alors ces procédés deviennent intéressants, car ils sont moins coûteux.

Pour être écologique, l'électrolyse doit utiliser une électricité peu coûteuse et n'ayant pas nécessité d'émissions de dioxyde de carbone. Se pose également le problème des déchets engendrés par la production nucléaire d'énergie.

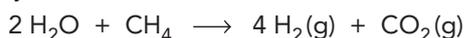
2 Les productions de dihydrogène du futur (p. 50-51)

1 a. Cette injection de méthane est source de production de dioxyde de carbone.

b. Sans injection de méthane :



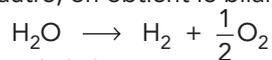
Avec injection de méthane :



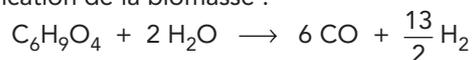
c. Le réacteur nucléaire permet de produire l'électricité nécessaire au fonctionnement de l'électrolyseur et de produire la chaleur permettant de travailler à haute température sans qu'il ne soit besoin de consommer de l'énergie électrique pour cela.

d. $\frac{I}{S}$ définit la densité de courant. L'électrolyse à haute température permet de travailler avec de fortes densités de courant, c'est-à-dire des intensités importantes traversant des surfaces relativement petites, ce qui permet d'avoir une production importante de dihydrogène pour une installation peu volumineuse.

2 En additionnant les réactifs des quatre réactions proposées d'un côté et les produits de ces quatre réactions de l'autre, on obtient le bilan suivant :



3 Gazéification de la biomasse :



Gaz shift : $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Bilan : $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_4 + 8 \text{H}_2\text{O} \longrightarrow 6 \text{CO}_2 + \frac{25}{2} \text{H}_2$

4 a. La photosynthèse est le processus biologique qui permet aux plantes de synthétiser des matières organiques à partir d'eau et de dioxyde de carbone en présence de lumière (la lumière solaire).

Les algues vertes et les cyanobactéries peuvent produire du dihydrogène à partir d'eau en présence de lumière (la lumière solaire).

b. Cette feuille artificielle est une cellule solaire en silice qui, plongée dans de l'eau et exposée à la lumière, produit du dihydrogène sur une face et du dioxygène sur l'autre face, c'est-à-dire réalise l'électrolyse de l'eau.

c. Dans les deux cas, c'est l'énergie lumineuse qui est à l'origine de la production de dihydrogène à partir d'eau.

Les cyanobactéries effectuent cette transformation dans un cas et le semi-conducteur à base de silice dans l'autre cas.

5 Bilan S'inscrivent dans le cadre du développement durable la bioproduction de dihydrogène, la photoélectrolyse et la transformation biochimique de la biomasse dans laquelle il y a production de dioxyde de carbone, mais ce dioxyde de carbone a été adsorbé au préalable par les végétaux traités ; il n'y a donc pas, au bilan, de production de dioxyde de carbone.

Les autres méthodes s'inscriront dans ce cadre si l'énergie électrique consommée est sans émission de CO_2 et sans production de polluants.

3 Les piles à combustibles (p. 52-53)

1 La pile PEMFC est une pile qui fonctionne à basse température et qui possède un électrolyte solide, la membrane échangeuse de protons.

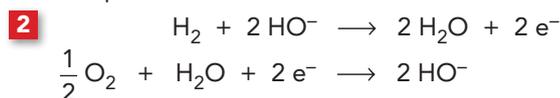
La réaction de fonctionnement d'une telle pile a pour équation : $\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(\ell)$

À l'anode, se produit une oxydation : l'anode constitue la borne négative de cette pile.

À la cathode, se produit une réduction : la cathode constitue la borne positive de cette pile.

L'ion H^+ joue un rôle important, car c'est lui qui assure le passage du courant électrique à l'intérieur de la pile.

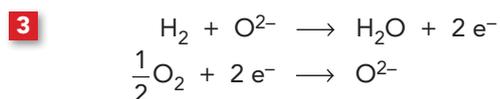
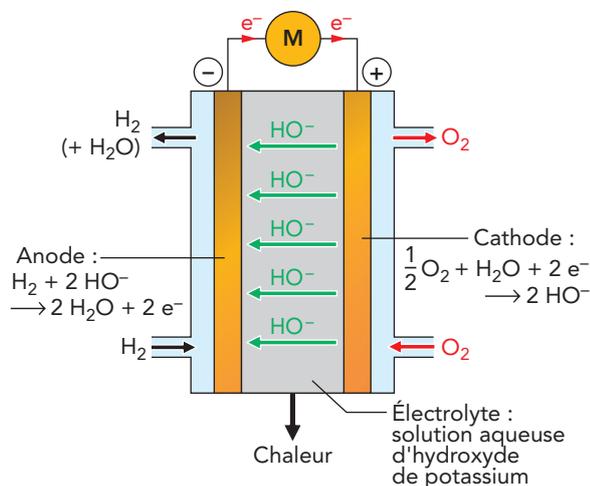
La structure de la cathode doit être hydrophobe puisqu'il y a production d'eau lors de la réduction cathodique et cette eau est éliminée.



d'où l'équation de la réaction globale de fonctionnement :

$$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(\ell)$$

Schéma récapitulatif de la pile en fonctionnement :



d'où l'équation de la réaction globale de fonctionnement :

$$\text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) \longrightarrow \text{H}_2\text{O}(\ell)$$

Pratique expérimentale

1 Électrolyse de l'eau (p. 54-55)

Matériel et produits

- Un électrolyseur ;
- un générateur de tension continue réglable ;
- deux multimètres ;
- deux tubes à hémolyse avec bouchons adaptés ;
- deux tubes en verre gradués ;
- un support et système de fixation ;
- cinq fils électriques ;
- un chronomètre ;
- une solution de sulfate de sodium à $0,50 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- du bleu de bromothymol ;
- des allumettes ;
- une buchette.

L'étude qualitative **A** permet de présenter simplement l'électrolyse qui n'a jamais été vue par les élèves : réactions aux électrodes, déplacement des porteurs de charge, etc.

Dans la partie **B**, le tracé de la caractéristique permet d'établir que l'électrolyseur est un récepteur et de déterminer sa force contre électromotrice.

La partie **C** permet de s'intéresser à l'aspect énergé-

4 Le platine est un catalyseur.

La découverte du CEA est importante, car elle permet de remplacer l'utilisation d'un métal rare et coûteux par des systèmes bio-inspirés à base de métaux abondants et peu coûteux tels que le fer et le nickel.

Une hydrogénase est une enzyme qui catalyse la réduction des ions hydrogène en dihydrogène, ainsi que l'oxydation du dihydrogène en ions hydrogène. Ce nouveau catalyseur est dit bio-inspiré, car il s'inspire de systèmes enzymatiques présents dans des organismes vivants.

5 Bilan Une pile à combustible est un générateur électrochimique dans lequel du dihydrogène est oxydé à l'anode et du dioxygène est réduit à la cathode, l'eau constituant le produit de la réaction. Différents types de piles à combustibles existent ; ils diffèrent par la nature de l'électrolyte et des ions assurant le passage du courant dans la pile, ainsi que par la température de fonctionnement.

Les utilisations des piles à combustibles sont multiples :

alimentation énergétique des engins spatiaux, domaines des transports (alimentation en électricité de bateaux, de voitures, de scooters, de bus, d'engins de manutention, etc.), domaines des instruments portables (téléphones, ordinateurs, recharge d'instruments portables, etc.), domaine du stationnaire (alimentation en électricité d'immeubles, de sites industriels, de sites isolés tels que les relais téléphoniques, etc.).

tique de la transformation réalisée et de déterminer le rendement de l'électrolyseur.

A Étude qualitative

1 Le gaz contenu dans le tube 1 est du dihydrogène. Il est caractérisé par son aboiement à la flamme.

Le gaz contenu dans le tube 2 est du dioxygène. Il est caractérisé par la façon dont il ravive l'incandescence d'une buchette.

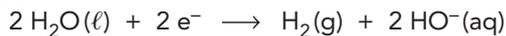
2 a. La solution contenue dans le tube 1 passe du vert au bleu : ceci traduit une augmentation de la concentration en ions hydroxyde, HO^- , et donc une formation d'ions hydroxyde dans le tube 1.

b. La solution contenue dans le tube 2 passe du vert au jaune : ceci traduit une augmentation de la concentration en ions hydrogène H^+ et donc une formation d'ions hydrogène dans le tube 2.

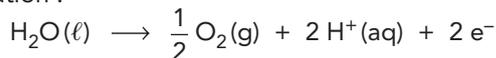
3 a. Le courant sort de la borne positive du générateur et rentre par sa borne négative.

b. Dans le circuit extérieur à l'électrolyseur, les porteurs de charge responsables du passage du courant sont des électrons : ils se déplacent en sens inverse du sens du courant électrique.

4 a. La réaction qui se produit à l'électrode 1 a pour équation :



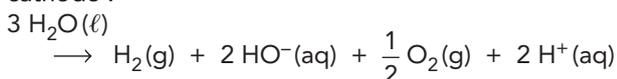
La réaction qui se produit à l'électrode 2 a pour équation :



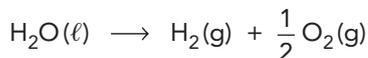
b. L'anode est l'électrode à laquelle se produit une oxydation : il s'agit de l'électrode 2.

La cathode est l'électrode à laquelle se produit une réduction : il s'agit de l'électrode 1.

5 a. L'équation de la réaction qui décrit le fonctionnement global de l'électrolyseur s'obtient en ajoutant les deux équations des réactions aux électrodes de façon à ce que le nombre d'électrons généré à l'anode soit égal au nombre d'électrons captés à la cathode :



En remplaçant $2 \text{HO}^-(\text{aq}) + 2 \text{H}^+(\text{aq})$ par $2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$, il vient :



b. Dans le tube 1, le volume de gaz formé est approximativement égal au double du volume de gaz formé dans le tube 2 et donc la quantité de dihydrogène formé est égale au double de la quantité de dioxygène formé.

Ceci est en accord avec les résultats obtenus à partir du tableau d'avancement ci-dessous.

Équation	$\text{H}_2\text{O}(\ell) \longrightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g})$		
Quantités initiales	Excès	0	0
Quantités en cours d'évolution	Excès	x	$\frac{x}{2}$

Ainsi, en notant V_m le volume d'une mole de gaz dans les conditions de l'expérience, on obtient :

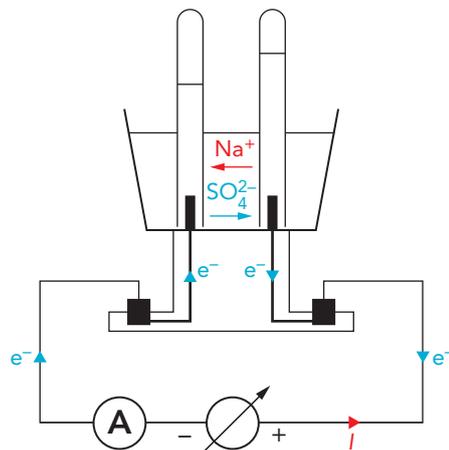
$$V(\text{H}_2) = x \cdot V_m \quad \text{et} \quad V(\text{O}_2) = \frac{x \cdot V_m}{2}$$

soit : $V(\text{H}_2) = 2 V(\text{O}_2)$

c. On a utilisé une solution de sulfate de sodium à la place d'eau pure pour travailler avec une solution nettement plus conductrice que l'eau.

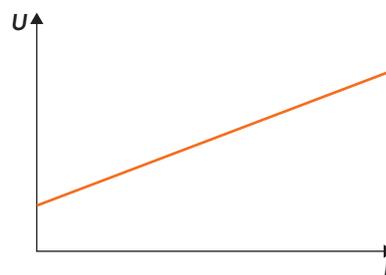
d. Dans la solution, les porteurs de charge sont les ions : les ions sodium, Na^+ , se déplacent dans le sens du courant et les ions sulfate, SO_4^{2-} , se déplacent en sens inverse.

e.



B Tracé de la caractéristique de l'électrolyseur

6



7 a. L'équation de la caractéristique est du type $U = E' + r \cdot I$ puisque la caractéristique ne passe pas par l'origine et est une droite de coefficient directeur positif.

b. L'électrolyseur est un récepteur puisqu'il reçoit de l'énergie électrique de la part du générateur branché à ses bornes.

c. E' correspond à l'ordonnée à l'origine ; la résistance interne de l'électrolyseur correspond au coefficient directeur de la portion de droite tracée.

C Détermination du rendement

8 1 : Énergie électrique ;

2 : énergie chimique ;

3 : énergie thermique.

9 a. $\mathcal{E}_E = U \cdot I_0 \cdot \Delta t$

b. $\mathcal{E}_{CH} = E' \cdot I \cdot \Delta t$

c. $\mathcal{E}_J = U_R \cdot I_0 \cdot \Delta t = R \cdot I_0^2 \cdot \Delta t$; effet Joule.

d. $\rho = \frac{\text{Énergie utile}}{\text{Énergie reçue}} = \frac{\mathcal{E}_{CH}}{\mathcal{E}_E} = \frac{E'}{U}$

10 a. La quantité de dihydrogène correspondant au volume de dihydrogène $V(\text{H}_2)$ vaut :

$$n(\text{H}_2) = \frac{V(\text{H}_2)}{V_m}$$

$$\mathcal{E}_d = \mathcal{E}_{dm} \cdot n(\text{H}_2) = \mathcal{E}_{dm} \cdot \frac{V(\text{H}_2)}{V_m} = 0,12 \text{ kJ}$$

b. \mathcal{E}_d et \mathcal{E}_{CH} sont voisines.

2 Étude d'une pile à combustible (p. 56-57)

Matériel et produits

- A** – Un panneau solaire ;
 – une lampe ;
 – une pile à combustible avec ses réservoirs et tuyaux ;
 – une seringue (fournie dans le kit) ;
 – des fils électriques adaptés (fournis dans le kit) ;
 – un chronomètre.

- B** – Une pile à combustible avec ses réservoirs contenant respectivement du dihydrogène et du dioxygène ;
 – une platine ;
 – une résistance de 100 Ω ;
 – des fils adaptés fournis avec le kit et des fils électriques dont on a enlevé une borne et dont on a très régulièrement enrobé l'extrémité obtenue de soudure (ceci pour avoir une extrémité fine afin de faire la liaison entre la pile et la platine, la platine permettant de brancher les autres appareils ou composants électriques) ;
 – un chronomètre.

La pile à combustible utilisée est la pile à combustible d'un modèle réduit de voiture, livrée avec le panneau solaire permettant de réaliser l'électrolyse de l'eau, distribuée par Jeulin, par exemple. Il faut toujours veiller à ce que sa membrane échangeuse de protons soit bien hydratée, son comportement en dépend.

La partie **A** permet de préparer le combustible dihydrogène et le comburant dioxygène de la pile. Elle permet aussi de faire un traitement quantitatif et de comparer la quantité de dihydrogène attendue à la quantité de dihydrogène obtenue.

La partie **B** permet de s'intéresser à l'aspect énergétique du fonctionnement de la pile à combustible.

L'intensité mesurée diminue lentement, la variation de la tension est moindre. On peut envisager de travailler avec une consommation de dihydrogène de 5 mL, mais il faudra parfois stopper le fonctionnement pour un volume consommé plus faible. Il faudra faire calculer une valeur moyenne de l'intensité et de la tension au cours de l'expérience.

On peut, pour finir, puisqu'il restera du combustible et du comburant dans les réservoirs faire fonctionner le modèle réduit de voiture, expérience beaucoup plus ludique, mais permettant d'ouvrir sur les usages actuels et futurs des piles à combustibles.

A Production du combustible et du comburant de la pile

- 1 a.** $2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2(\text{g})$
b. $\text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$
2 $\text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$

Équation	$\text{H}_2\text{O}(\ell) \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g})$		
Quantités initiales	Excès	0	0
Quantités en cours d'évolution	Excès	x	$\frac{x}{2}$

Le tableau d'avancement montre que la quantité de dioxygène obtenue est égale à la moitié de celle de dihydrogène. Les volumes de gaz obtenus sont donc dans le même rapport. L'expérience confirme ces prévisions.

3 $n(\text{H}_2) = \frac{V(\text{H}_2)}{V_m} = \frac{10 \times 10^{-3}}{24} = 4,2 \times 10^{-4} \text{ mol}$

4 $Q = I \cdot \Delta t$ et $Q = n(\text{e}^-) \cdot F$

Or, d'après l'équation 1a : $\frac{n(\text{e}^-)}{2} = n(\text{H}_2)_{\text{att}}$,
 soit $n(\text{e}^-) = 2n(\text{H}_2)_{\text{att}}$

d'où $n(\text{H}_2)_{\text{att}} = \frac{I \cdot \Delta t}{2F}$ et $V(\text{H}_2)_{\text{att}} = \frac{I \cdot \Delta t \cdot V_m}{2F}$.

- 5** $\rho < 1$. Le volume attendu est supérieur au volume obtenu.

Le résultat peut aussi être faussé si la valeur de l'intensité traversant l'électrolyseur (et de la tension imposée aux bornes de l'électrolyseur) a légèrement varié au cours de l'expérience.

B Fonctionnement de la pile à combustible

- 6** 1 : énergie chimique ; 2 : énergie électrique ;
 3 : énergie thermique.

7 a. $\mathcal{E}_{\text{CH}} = E \cdot I_0 \cdot \Delta t$

b. $\mathcal{E}_{\text{E}} = U \cdot I_0 \cdot \Delta t$

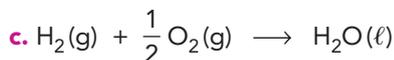
c. Il se produit également une transformation d'énergie chimique en énergie thermique lorsque la pile débite un courant électrique.

d. Le rendement est égal à l'énergie disponible aux bornes de la pile par l'énergie chimique libérée par la pile :

$$\rho = \frac{U \cdot I_0 \cdot \Delta t}{E \cdot I_0 \cdot \Delta t} = \frac{U}{E}$$

8 a. Équation de l'oxydation qui se produit à l'anode : $\text{H}_2(\text{g}) \rightarrow 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$

b. Équation de la réduction qui se produit à la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\ell)$



9 $\mathcal{E}_d = E_1 \cdot V$, avec V , volume de dihydrogène consommé dans l'expérience, exprimé en m^3 .

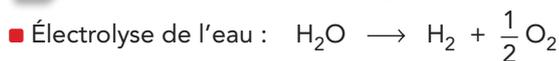
$\mathcal{E}_d = 10^4 \times 10^3 \times 10^{-6} \times V = 10 V$ en J, avec V exprimé en mL.

$$\frac{\mathcal{E}_d}{\mathcal{E}_{\text{CH}}} > 1$$

Le combustible introduit ne contribue pas en totalité à la production d'énergie; il y a des fuites et des pertes.

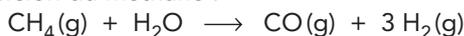
Résolution de problèmes scientifiques

2 Productions de dihydrogène (p. 60)



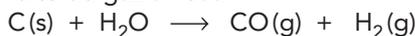
Cette transformation nécessite 282 kJ pour synthétiser une mole de dihydrogène.

Conversion du méthane :



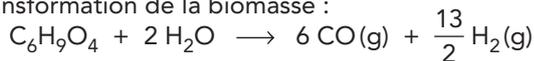
Cette transformation nécessite $\frac{244}{3} = 81$ kJ pour synthétiser une mole de dihydrogène.

Réaction dite du gaz à l'eau :



Cette transformation nécessite 170 kJ pour synthétiser une mole de dihydrogène.

Transformation de la biomasse :



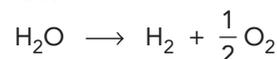
Cette transformation nécessite $\frac{880}{\left(\frac{13}{2}\right)} = 135$ kJ pour

synthétiser une mole de dihydrogène.

Le mode de production du dihydrogène le moins coûteux en énergie est donc la conversion du méthane. On peut noter que la transformation de la biomasse, plus coûteuse en énergie, pourrait être intéressante si on considère le coût des matières premières méthane et biomasse.

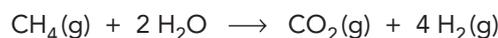
■ Pour s'intéresser à l'aspect écologique, il faut prendre en compte le mode de production de l'énergie nécessaire à la transformation et la proportion de dioxyde de carbone libérée par mole de dihydrogène formée. Il est alors nécessaire de s'intéresser au bilan global de chaque transformation (en tenant compte de la transformation du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone).

Électrolyse de l'eau :



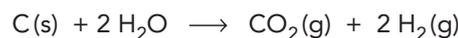
Cette transformation nécessite 282 kJ pour synthétiser une mole de dihydrogène et ne libère pas de dioxyde de carbone.

Conversion du méthane :



Cette transformation libère $\frac{1}{4} = 0,25$ mol de dioxyde de carbone lors de la synthèse d'une mole de dihydrogène.

Réaction dite du gaz à l'eau :



Cette transformation libère $\frac{1}{2} = 0,5$ mol de dioxyde de carbone lors de la synthèse d'une mole de dihydrogène.

Transformation de la biomasse :



Cette transformation libère $\frac{6}{\left(\frac{25}{2}\right)} = 0,48$ mol de

dioxyde de carbone lors de la synthèse d'une mole de dihydrogène.

La méthode la plus écologique est l'électrolyse de l'eau lorsque l'énergie consommée lors de la synthèse est sans émission de dioxyde de carbone ou de déchets nocifs, ce qui est le cas lorsque sont mises en jeu des énergies renouvelables.

Sinon, la méthode la plus écologique est la conversion du méthane.

3 Rendement d'une pile à combustible PEMFC (p. 61)

Soit $\mathcal{P}_j = U \cdot j$ la puissance fournie par la pile par cm^2 de surface. Le calcul de cette puissance pour les différentes valeurs de la tension aux bornes de la pile

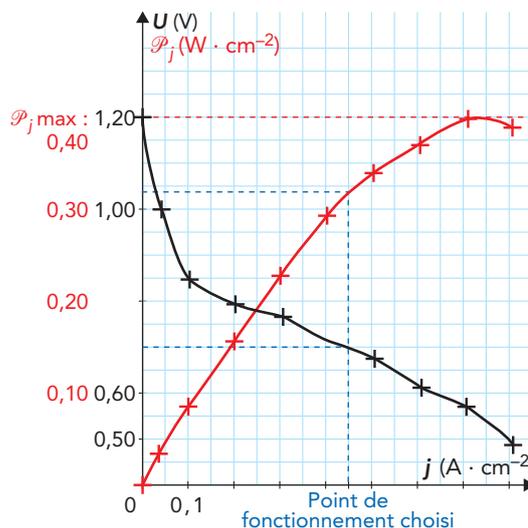
et de la densité de courant surfacique conduit aux valeurs ci-dessous :

j ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0	0,03	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80
U (V)	1,2	1,0	0,85	0,80	0,77	0,72	0,68	0,62	0,57	0,49
\mathcal{P}_j ($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0	0,03	0,085	0,16	0,23	0,29	0,34	0,37	0,40	0,39

Les graphes de la tension en fonction de la densité de courant surfacique et de la puissance par cm² de surface en fonction de la densité de courant surfacique sont donnés ci-contre.

Le point de fonctionnement choisi correspond à une puissance importante $\mathcal{P}_j = 0,32 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, mais non maximale ($\mathcal{P}_{j \text{ max}} = 0,40 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$).

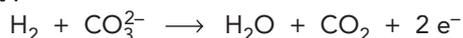
$\frac{\mathcal{P}_j}{\mathcal{P}_{j \text{ max}}} = 0,80$. Le véhicule peut donc bénéficier de plus de puissance s'il en a besoin pour une accélération, par exemple.



4 Fonctionnement d'une pile à combustible MCFC (p. 61)

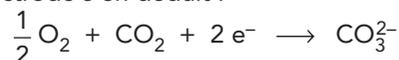
Lorsque la pile débite un courant, des réactions se produisent aux électrodes.

Une oxydation se produit à l'anode. Des électrons partent de l'électrode à laquelle arrive du dihydrogène : c'est donc l'anode. Des ions carbonate arrivent à cette électrode et du dioxyde de carbone en part. L'équation de la réaction qui s'y produit s'en déduit :

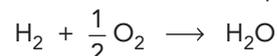


Une réduction se produit à la cathode. Des électrons arrivent à l'électrode à laquelle arrive du dioxygène ; il s'agit donc de la cathode. Du dioxyde de carbone

arrive à cette électrode et des ions carbonate en partent. L'équation de la réaction qui se produit à cette électrode s'en déduit :



Le bilan de fonctionnement de cette pile s'écrit :



Les ions carbonate sont les porteurs de charge qui assurent le passage du courant dans la pile. Cette pile est une pile à carbonate fondu. L'électrolyte est un carbonate métallique fondu : cette pile doit donc fonctionner à haute température.

5 Pouvoir énergétique du dihydrogène (p. 61)

L'énergie libérée \mathcal{E}_m lors de la combustion d'une unité de masse de chacun des combustibles s'obtient à partir de l'énergie \mathcal{E} libérée par mole de combustible :

$$\mathcal{E}_m = \frac{\mathcal{E}}{M}$$

où M est la masse molaire du combustible exprimée en $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$.

L'énergie libérée par unité de volume ($V = 1 \text{ m}^3$) de combustible s'obtient à partir de l'énergie libérée par unité de masse \mathcal{E}_m :

$$\mathcal{E}_v = \mathcal{E}_m \cdot \mu$$

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Le combustible qui a le meilleur rapport énergie/masse est le dihydrogène, mais celui qui a le meilleur rapport énergie/volume est l'essence (c'est le seul des combustibles proposés qui existe dans les conditions ordinaires de température et de pression à l'état liquide et non gazeux).

Combustible	Dihydrogène	Méthane	Essence
Formule	H_2	CH_4	C_8H_{18}
Masse molaire ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$)	$2,0 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-2}$	0,114
\mathcal{E}_m ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$1,2 \times 10^5$	$5,0 \times 10^4$	$4,43 \times 10^4$
\mathcal{E}_v ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	$1,1 \times 10^4$	$3,3 \times 10^4$	$3,0 \times 10^7$

Émetteurs et récepteurs sonores

Chapitre

4

Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 La voie et l'oreille humaines (p. 68-69)

1 Les trois parties du corps qui interviennent dans la voix sont les poumons, les cordes vocales et les résonateurs (gorge, nez, bouche).

2 Les principales étapes de la production d'un son par la voix sont : souffle – vibration des cordes vocales – résonance des cavités – vibration de l'air.

Les principales étapes de la perception d'un son par l'oreille sont : vibration de l'air – vibration du tympan – vibration des osselets – vibrations des cellules ciliées – signal électrique.

3 Les différences de tessitures (domaines de fré-

quences des sons produits de façon homogène) sont dues aux cordes vocales (surtout l'épaisseur).

4 Le diagramme du document 5 utilise une échelle logarithmique tout comme celui du document 3.

5 Le niveau d'intensité sonore est limité à 100 dB en sortie des baladeurs et à 105 dB dans les lieux musicaux. Ces niveaux sont inférieurs à celui du seuil de douleur, mais supérieurs à la limite de nocivité. Il faut prendre en compte la durée d'exposition en plus de l'intensité sonore du son.

6 Bilan On constate que l'oreille est sensible à certains sons et, en particulier, à ceux produits par la voix.

2 Microphone et haut-parleur (p. 70-71)

1 La directivité de ce microphone dépend de la fréquence du son. Il est quasiment omnidirectionnel aux basses fréquences puisque l'on n'observe quasiment pas d'atténuation, quel que soit l'angle repérant la position de la source par rapport au microphone (document 2). Il est cardioïque pour les fréquences plus élevées : l'atténuation est forte quand la source est repérée par un angle supérieur à 120°.

2 Un microphone ne capte pas tous les sons de la même façon ; il a une bande passante pour laquelle les sons, dont la fréquence se situe dans cette gamme, sont captés avec une bonne qualité. Dans le cas du microphone décrit au document 2, la bande passante est constituée des fréquences comprises entre 100 Hz et 11 kHz environ.

3 La bande passante d'un haut-parleur permet de le classer dans les catégories tweeter, médium ou boomer.

DE35	8PE21	12PS100
Tweeter	Médium	Boomer

4 Un microphone joue le rôle de l'oreille humaine, c'est-à-dire celui de capter les sons.

Le haut-parleur joue le rôle de l'appareil vocal, celui de produire les sons.

5 Bilan Pour le microphone électrodynamique, les vibrations sonores causent le mouvement d'une membrane et de la bobine qui lui est solidaire. Grâce au phénomène d'induction électromagnétique, le mouvement de la bobine placée dans un champ magnétique entraîne l'apparition d'une tension aux bornes du microphone. Cette tension a une amplitude et une fréquence proportionnelles à celles des vibrations sonores.

L'énergie mécanique du son est transformée en énergie électrique.

Pour le haut-parleur électrodynamique, le principe de fonctionnement est inverse : la tension aux bornes du haut-parleur met en mouvement une bobine parcourue par un courant. Une membrane solidaire de la bobine bouge à son tour ce qui permet de créer des vibrations sonores de même fréquence que celle de la tension et dont l'amplitude varie comme celle de la tension. L'énergie électrique est transformée en énergie mécanique.

Les deux dispositifs possèdent une membrane solidaire d'une bobine, ainsi qu'un aimant créant un champ magnétique.

3 La restitution des sons (p. 72-73)

1 Les ondes avant et arrière émises par un haut-parleur peuvent s'annuler par interférences destructives.

Pour les éviter, il faut faire en sorte que les ondes arrière ne se superposent pas aux ondes avant. Il faut, par exemple, supprimer le fond de l'enceinte pour supprimer les réflexions.

On peut aussi créer un déphasage supplémentaire de 180° pour les ondes arrière, qui, avec le déphasage initial de 180° , fait que ces ondes sont en phase avec les ondes avant, il y a alors interférences constructives.

2 Les tests réalisés, dans le but de comparer la qualité des enceintes, portent sur :

- les vibrations;
- la pureté des graves;
- le rendement de l'enceinte;
- la directivité.

3 Bilan Les critères de qualité des enceintes et des casques sont la bande passante (domaine de fréquences pour une bonne restitution des sons). Pour les enceintes s'ajoute l'absence de vibration du coffre et pour les casques l'isolation phonique.

4 La reconnaissance vocale (p. 74-75)

La synthèse demandée doit mettre en avant :

- le principe technique de la commande vocale en utilisant notamment l'exemple des mots prononcés dans le texte;
- l'apport de l'informatique dans le traitement des données;
- l'utilisation de la reconnaissance vocale dans la commande vocale et dans l'identification;

- les applications récentes telle la dictée à la machine (smartphones, logiciels, etc.);
- les progrès dans les systèmes multilocuteurs.

Bibliographie

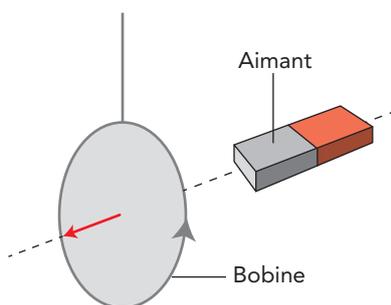
J.-P. HATON, *Reconnaissance automatique de la parole : du signal à son interprétation*, Dunod, 2006.

Pratique expérimentale

1 Principe de fonctionnement d'un haut-parleur et d'un microphone (p. 76-77)

A Le haut-parleur électrodynamique

1 La schématisation doit mettre en évidence le sens de parcours du courant dans la bobine (flèche grise) ainsi que le sens du champ magnétique créé par l'aimant (flèche rouge).



2 Le sens de la force de Laplace dépend du sens du courant électrique parcourant la bobine et de l'orientation du champ magnétique créé par l'aimant.

3 On applique aux bornes du haut-parleur une tension de fréquence réglée à la valeur f . On éclaire la membrane du haut-parleur avec un stroboscope en partant de la fréquence f_e la plus haute possible. On diminue alors la fréquence f_e des éclairs lumineux jusqu'à observer une immobilité apparente de la membrane.

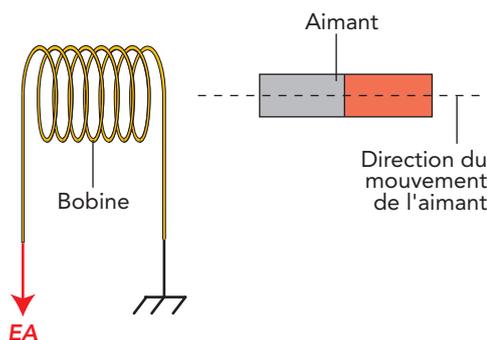
4 On a, aux erreurs expérimentales près, $f = f_{\text{vib}}$.

5 a. Un transducteur est un dispositif qui convertit une grandeur physique en une autre.

b. Le haut-parleur est un transducteur électro-acoustique puisqu'une grandeur électrique (la tension appliquée à ses bornes) est convertie en un son.

B Le microphone électrodynamique

6 La schématisation doit mettre en évidence la direction du déplacement de l'aimant devant une bobine et l'apparition d'une tension aux bornes de la bobine.

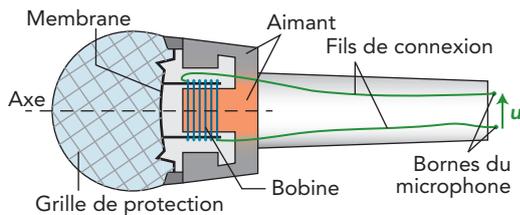


7 La tension induite apparaît dès lors qu'il y a un déplacement relatif de la bobine et de l'aimant.

8 L'orientation de l'aimant, donc du champ magnétique, par rapport à la bobine, ainsi que la vitesse de déplacement ont une influence sur le signe et sur l'amplitude de la tension induite.

9 La période de la tension induite est mesurée à l'oscilloscope; sa fréquence est l'inverse de cette période. La fréquence du mouvement de l'aimant est déterminée par stroboscopie ou en mesurant la période des oscillations du mouvement de l'aimant. Ces deux fréquences sont égales.

10 Les éléments modélisés sont l'aimant et la bobine du microphone :



11 a. Un transducteur est un dispositif qui convertit une grandeur physique en une autre.

b. Le haut-parleur est un transducteur acousto-électrique puisque le son induit un déplacement de la bobine devant l'aimant, ce qui entraîne l'apparition d'une tension induite.

C La fréquence des signaux électriques

12 On obtient, par exemple, les périodes suivantes : $T_1 = 2,00$ ms pour la tension alimentant le haut-parleur;

$T_2 = 1,96$ ms pour la tension aux bornes du microphone.

On peut considérer pour T_1 , avec un niveau de confiance de 95 %, une incertitude :

$$U(T_1) = 2 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{12}} \times 0,2 \times 2,00 \times 10^{-4} = 3,27 \times 10^{-5} \text{ s}$$

(base de temps : $200 \mu\text{s}/\text{DIV}$, 1 graduation = $\frac{1}{5}$ DIV).

De même, $U(T_2) = U(T_1)$ avec un niveau de confiance de 95 %.

13 a. La fréquence de la tension alimentant le haut-parleur est, par exemple :

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = 5,00 \times 10^2 \text{ Hz}$$

et la fréquence de la tension aux bornes du microphone est :

$$f_2 = \frac{1}{T_2} = 5,10 \times 10^2 \text{ Hz}$$

On a donc $U(f_1) = 5,00 \times 10^2 \times \frac{3,27 \times 10^{-5}}{2,00 \times 10^{-5}} = 8,17 \text{ Hz}$

et $U(f_2) = 5,10 \times 10^2 \times \frac{3,27 \times 10^{-5}}{1,96 \times 10^{-5}} = 8,50 \text{ Hz}$ avec un

niveau de confiance de 95 %. On en conclut que :

$$f_1 = (500,0 \pm 8,2) \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f_2 = (510,2 \pm 8,5) \text{ Hz}.$$

b. Les deux encadrements de f_1 et f_2 se recoupant, on peut considérer les deux fréquences comme égales avec un niveau de confiance de 95 %.

D Réversibilité d'un transducteur électro-acoustique

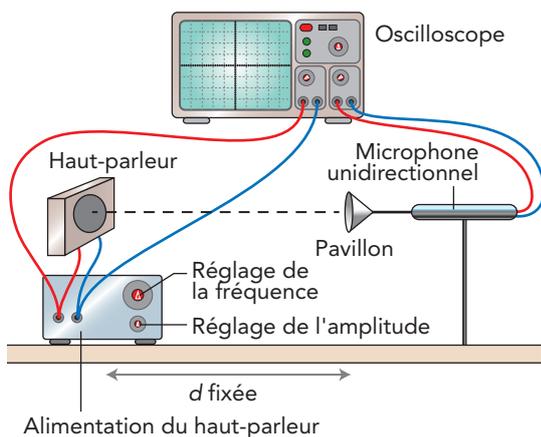
14 Les éléments communs au microphone et au haut-parleur électrodynamiques sont la membrane, la bobine et l'aimant.

15 Un haut-parleur peut devenir un microphone électrodynamique, il suffit de mesurer la tension à ses bornes lorsque sa membrane bouge.

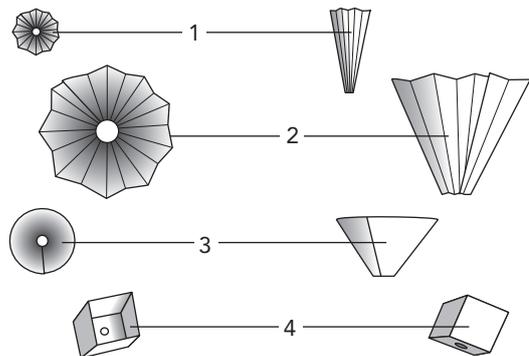
Protocole possible : on place deux haut-parleurs face à face, le premier est soumis à une tension électrique de fréquence réglable. On mesure la tension aux bornes du second.

2 Forme de l'oreille et perception des sons (p. 78)

1 Le dessin ci-dessous résume le protocole opératoire mis en œuvre pour répondre à la problématique.



Quatre formes de pavillons pouvant être testées :



2 On obtient pour différentes formes de pavillons les résultats suivants :

Pavillon	Amplitude du signal (V)		
	Signal à 500 Hz	Signal à 2 000 Hz	Signal à 4 000 Hz
0	0,2	0,6	0,4
1	0,5	1,6	1,9
2	1,6	3,0	2,2
3	0,2	0,7	0,5
4	0,3	0,6	0,3

Le cas 0 correspond à l'absence de pavillon.

Le pavillon 3 en forme de cornet est celui qui permet de retrouver le cas 0. Les cas 1 et 2 semblent permettre une amélioration de la perception auditive puisqu'on observe une amplification de l'amplitude aux trois fréquences testées.

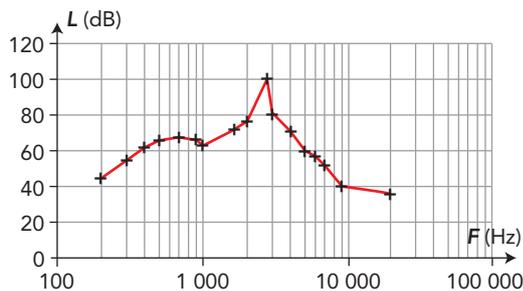
Il est à signaler que des mesures complémentaires peuvent être réalisées en se rendant chez un spécialiste de l'audition.

3 Courbe de réponse et bande passante d'un haut-parleur (p. 79)

1 La caisse acoustiquement isolée évite :
 – de capter avec le sonomètre des sons autres que ceux produits par le haut-parleur ;
 – de gêner les personnes dans la salle avec le son du haut-parleur (très désagréable à certaines fréquences).

2 L'amplitude de la tension doit rester constante, car, si elle est modifiée, le niveau sonore est aussi modifié et la mesure obtenue ne dépendrait pas seulement de la fréquence.

3 Voici un exemple de réponse obtenue :



4 Si on choisit comme niveau d'intensité sonore de référence 50 dB, par exemple, alors, pour le haut-parleur correspondant à la courbe précédente, la bande passante est comprise entre 200 et 7000 Hz environ.

5 Si la distance augmente, le niveau d'intensité sonore est moins important.

Si on change de haut-parleur, la forme de la courbe et la bande passante sont modifiées.

6 Pour définir la bande passante, il faut donc choisir un niveau d'intensité sonore de référence. Puisque le niveau d'intensité sonore dépend de la distance entre l'émetteur et le haut-parleur, une unique valeur de référence ne suffit pas à rendre compte de la réponse du haut-parleur dans n'importe quelles conditions.

Résolution de problèmes scientifiques

2 La maladie du surfeur (p. 82)

L'exostose, la maladie du surfeur, est une maladie qui se caractérise par l'apparition d'os dans le conduit auditif externe. La croissance de ces os est favorisée par le contact répété avec l'eau.

L'examen audiométrique de la patiente met en évidence une perte d'audibilité pour toutes les fréquences testées, mais d'autant plus forte que les sons ont une fréquence élevée (supérieure à 1000 Hz). Sa perte est supérieure à celle rencontrée par moins de 10 % de la population féminine de son âge : elle fait

donc partie des personnes les plus atteintes dans la population. On peut considérer que, dans la gamme 1000-4000 Hz, elle est atteinte de surdité légère et de surdité modérée (perte comprise entre 40 et 70 dB) pour des sons de fréquences supérieures à 4000 Hz.

Un examen audiométrique à la suite d'une opération de l'exostose pourrait montrer une amélioration de l'audition si l'exostose est responsable de sa surdité, ou aucune amélioration si l'exostose n'est pas le facteur de surdité.

3 Bonne utilisation d'un microphone (p. 83)

1. Le PAD permet de réduire le niveau de sortie du microphone.

À cause de la définition logarithmique du niveau d'intensité sonore, une diminution de 3 dB du niveau

correspond à une division par deux de l'intensité. Si l'intensité sonore est divisée par deux, alors :

$$I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{L_2}{10}} = \frac{I_1}{2} = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{L_1}{10}}}{2}$$

On déduit $L_2 = L_1 - 3$, en décibel.

2. Les problèmes directionnels sont gérés à l'aide du bouton *Polar Pattern*, ceux de filtrage par les deux autres boutons.

a. Il s'agit de bien capter les sons face à chaque acteur ($\theta = 0^\circ$ et 180° pour un microphone placé entre eux) et d'éliminer les sons de fréquence 80 Hz dans toutes les directions.

Réglages :

- *Polar Pattern* : « figure 8 » ;
- *High-Pass Filter* : sur 80 Hz ou 100 Hz ;
- *PAD* : 0 (aucune atténuation sur l'ensemble des fréquences n'est nécessaire).

b. Il s'agit de diminuer le niveau d'intensité sonore dans toute la gamme de fréquences et dans toutes les directions.

Réglages :

- *Polar Pattern* : « Omni » ;
- *High-Pass Filter* : mini (20 Hz) ;
- *PAD* : -5 ou -10 dB.

c. Il s'agit de bien capter les sons émis par l'actrice en face d'elle (θ compris entre 90 et 270° environ).

Réglages :

- *Polar Pattern* : « Cardioïd » ;
- *High-Pass Filter* : minimum (20 Hz) pour que les paroles restent audibles, on choisit le réglage provoquant le moins de filtrage ;
- *PAD* : 0 (aucune atténuation sur l'ensemble des fréquences n'est nécessaire).

4 Reconnaissance vocale (p. 84)

Les quatre mots ne diffèrent que par leur voyelle. D'après le texte, le repérage des formants permet d'identifier les voyelles. Les formants correspondent à de fortes amplitudes, donc à des zones sombres sur

les spectrogrammes fournis. En cas d'ambiguïté, on examine le reste des spectrogrammes (les autres composantes d'amplitude assez forte sont les zones colorées moins sombres qu'au niveau des formants).

On compare les spectrogrammes des quatre voyelles à ceux du document 4 et on déduit l'identification des quatre mots :

Spectrogrammes de référence	Formants	Autres composantes d'amplitude assez forte	Spectrogrammes à attribuer	Formants	Autres composantes d'amplitude assez forte
Voyelle « i »	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz)	Vers 500 Hz	A	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz)	Vers 600, 800, 1 000 et 1 150 Hz
Voyelle « è »	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz), F_3 (450 Hz), F_4 (620 Hz), F_5 (800 Hz)	De 1 000 à 2 500 Hz tous les 150 Hz environ	B	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz), F_3 (450 Hz), F_4 (620 Hz), F_5 (800 Hz)	De 1 000 à 2 500 Hz tous les 150 Hz environ
Voyelle « o »	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz), F_3 (450 Hz), F_4 (620 Hz), F_5 (800 Hz)	Dans le domaine 0-1 000 Hz, mais aucune au-delà	C	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz), F_3 (450 Hz), F_4 (620 Hz), F_5 (800 Hz)	Dans le domaine 0-1 000 Hz, mais aucune au-delà
Voyelle « ou »	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz), F_4 (620 Hz)	Vers 600 et 800 Hz	D	F_1 (200 Hz), F_2 (350 Hz)	Vers 500 Hz

Grâce aux formants, on attribue le spectrogramme B au mot « lait » et le spectrogramme C au mot « lot ». Grâce aux formants et au reste du spectrogramme, on attribue le spectrogramme D au mot « lit ». Par élimination, on en déduit que le spectrogramme A est celui du mot « loup ».

5 Directivité d'un haut-parleur (p. 85)

Le niveau d'intensité sonore est donné par la relation :

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

Avec la valeur donnée à 1 m du niveau d'intensité sonore, on déduit l'intensité sonore I à 1 m sur l'axe principal du haut-parleur :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} = 10^{-1} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

On cherche l'intensité sonore à la distance $d' = 50$ m de la source.

Lorsqu'une source émet de la même façon dans toutes les directions, l'intensité sonore est uniformément répartie sur une surface sphérique. Cette intensité varie donc comme l'inverse du carré de la distance à laquelle on se trouve de la source, elle est divisée par quatre lorsque la distance double.

Dans la situation de l'exercice, l'émission n'est pas la même dans toutes les directions. Cependant, dans une direction donnée, la relation précédente est toujours valable : l'intensité varie comme l'inverse du carré de la distance.

$$I' = \frac{0,1}{50^2} = 4 \times 10^{-5} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Le niveau d'intensité sonore est donné par la relation :

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

6 Forum de discussion (p. 85)

Canardoc ne répond pas à la question posée, mais sa réponse est importante en termes de sécurité.

La réponse de Chocopops est maladroite dans sa formulation, car ce n'est pas la perception de la fréquence qui est modifiée. Une fréquence n'est pas perçue, une onde sonore de fréquence l'est. Sa réponse est, de plus, incomplète, car elle ne précise rien sur la longueur d'onde qui intervient dans la relation entre v et f .

La réponse de Vince est totalement fautive : les cordes vocales vibrent, mais rien ne se fixe dessus.

Avec la valeur précédemment calculée de I' , on déduit un niveau d'intensité sonore L' :

$$L' = 10 \cdot \log \frac{4,0 \times 10^{-5}}{10^{-12}}$$

d'où :

$$L' = 76 \text{ dB.}$$

À cette même distance, mais dans une direction faisant un angle de 60° avec l'axe principal, il y a une perte de 6 dB (voir le diagramme d'émission du haut-parleur).

Le niveau d'intensité sonore, à 50 m de la source et dans une direction repérée par $\theta = 60^\circ$, est donc de 70 dB.

7 Remplacement de haut-parleur (p. 86)

Problème 1

1. Pour mesurer la fréquence du son produit il faut capter ce son avec un microphone et mesurer la fréquence de la tension induite aux bornes du microphone.

2. On lit sur la courbe du document 2, à 1 m du haut-parleur, un niveau d'intensité sonore de 100 dB pour ce son de fréquence 2000 Hz. On en déduit l'intensité sonore à cette distance :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{100}{10}} = 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

La puissance sonore émise par le haut-parleur situé à la distance $d = 1$ m est :

$$\mathcal{P} = I \cdot 4\pi d^2 = 10^{-2} \times 4\pi = 1,26 \times 10^{-1} \text{ W}$$

À la distance d' et pour la même émission de la source sonore, on a :

$$I' = \frac{\mathcal{P}}{4\pi(d')^2} = \frac{I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} \times 4\pi d^2}{4\pi(d')^2} = \frac{I_0 d^2 10^{\frac{L}{10}}}{(d')^2}$$

Le son de fréquence égale à 2000 Hz est juste audible si $L' = 0$ dB, d'après le document 3. Cela correspond à :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L'}{10}}$$

Il vient donc :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L'}{10}} = \frac{I_0 10^{\frac{L}{10}}}{d'^2}$$

La réponse de Titi du 33 est rigoureuse d'un point de vue scientifique. Elle s'appuie sur la relation $\lambda = \frac{v}{f}$; où λ est la longueur d'onde des ondes sonores (ici fixée par les dimensions de la caisse de résonance), v leur célérité et f leur fréquence.

La réponse de Zazou ne précise en rien en quoi la voix serait plus aiguë. De plus, le gaz inhalé l'est à température ambiante, il ne s'agit donc pas d'un problème de refroidissement.

soit :

$$d' = \sqrt{10^{\frac{L-L'}{10}}} = \sqrt{10^{\frac{100-0}{10}}} = 10^5 \text{ m ; soit 100 km.}$$

Cette valeur est théorique.

En réalité, elle est bien plus faible, car le son est atténué lors de sa propagation.

Problème 2

1. On lit sur la courbe, à 1 m du haut-parleur, un niveau d'intensité sonore de 100 dB. On en déduit l'intensité sonore à cette distance :

$$I = I_0 \cdot 10^{\frac{L}{10}} = 10^{-12} \times 10^{\frac{100}{10}} = 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

La puissance sonore émise par le haut-parleur situé à la distance $d = 1$ m est :

$$\mathcal{P} = I \cdot 4\pi d^2 = I \times 4\pi = 10^{-2} \times 4\pi = 1,26 \times 10^{-1} \text{ W}$$

Le rendement est $\rho = \frac{\mathcal{P}}{\mathcal{P}_{\text{élect}}} = \frac{1,26 \times 10^{-1}}{30} = 0,0042$; soit 0,42 %.

2. Le haut-parleur n° 2 a une bande passante bien plus étroite que le haut-parleur n° 1 ; il ne peut pas le remplacer pour tous les usages, en particulier, pour émettre des sons de fréquence inférieure à 200 Hz.

Instruments de musique

Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 La musique est une science (p. 88-89)

1 Le rapport de fréquences de deux notes séparées d'une octave est égal à deux ; pour deux notes séparées par une quinte, le rapport est égal à $\frac{3}{2}$; pour deux notes séparées par une tierce majeure, il est égal à $\frac{5}{4}$.

2 a. Une note à la quinte occupe la cinquième position par rapport à une note de référence. D'après le tableau, la note à la quinte d'un Do est un Sol.

b. La note à la quinte d'un Do de fréquence $f_{Do} = 100$ Hz a une fréquence $f = 1,5 f_{Do} = 150$ Hz ; d'après le tableau du document 3, cette fréquence correspond à un Sol.

La note à la quinte du Sol de fréquence $f_{Sol} = 150$ Hz a une fréquence $f = 1,5 f_{Sol} = 225$ Hz.

On divise par 2 cette fréquence pour la ramener dans l'octave ($100 \text{ Hz} < f < 200 \text{ Hz}$). On obtient une valeur de 112,5 Hz, qui est un Ré.

La note à la quinte du Ré de fréquence $f_{Ré} = 112,5$ Hz a une fréquence $f = 1,5 f_{Ré} = 168,8$ Hz ; c'est un La.

La note à la quinte du La de fréquence $f_{La} = 168,8$ Hz a une fréquence $f = 1,5 f_{La} = 253,1$ Hz.

On divise par 2 la valeur exacte de cette fréquence pour la ramener dans l'octave. On obtient une valeur de 126,6 Hz, qui est un Mi.

La note à la quinte du Mi de fréquence $f_{Mi} = 126,6$ Hz a une fréquence $f = 1,5 f_{Mi} = 189,8$ Hz ; c'est un Si.

On obtient la fréquence du Fa par quinte descendante :

$$f_{Fa} = \frac{f_{Do}}{1,5} \times 2 = 133,3 \text{ Hz.}$$

3 La gamme tempérée contient 12 demi-tons.

Le rapport de fréquences entre deux demi-tons consécutifs est de $\sqrt[12]{2}$.

4 Un son harmonieux est constitué de notes dont les rapports de fréquences sont simples. Par exemple, lorsque le rapport de fréquences entre deux notes est égal à deux, la combinaison de ces notes est agréable à l'oreille.

5 Deux exemples de réponses :

• accord (Do, Sol, Ré) : les notes sont séparées deux à deux par une quinte.

En effet : $\frac{f_{Sol_3}}{f_{Do_3}} = \frac{392,00}{261,63} = 1,5$ et $\frac{f_{Ré_4}}{f_{Sol_3}} = \frac{587,33}{392,00} = 1,5$;

• accord (Do, Mi, Sol) : le Do et le Mi sont à la tierce l'un de l'autre. Le Do et le Sol sont à la quinte l'un de l'autre.

En effet : $\frac{f_{Mi_3}}{f_{Do_3}} = \frac{329,63}{261,63} = 1,26$ et $\frac{5}{4} = 1,25$;

ces notes sont à la tierce l'une de l'autre.

$$\frac{f_{Sol_3}}{f_{Do_3}} = \frac{392,00}{261,63} = 1,5 ;$$

ces notes sont à la quinte l'une de l'autre.

6 Bilan La musique peut être considérée comme une discipline scientifique, car les notes sont caractérisées par leurs fréquences.

Les fréquences des notes de la gamme tempérée ou de la gamme de Pythagore sont calculées les unes par rapport aux autres. De même, un son harmonieux est constitué de notes dont les rapports de fréquences sont simples (octave, quinte, tierce, etc.).

2 Les instruments à cordes (p. 90-91)

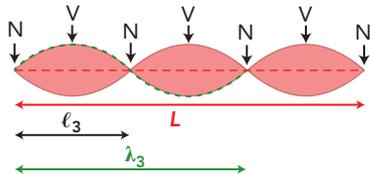
1 a. • « les molécules d'air » : l'air est un mélange gazeux ; l'expression correcte aurait été « les molécules des gaz constituant l'air ».

• « ... et les molécules cherchent aussitôt à retrouver leur espace vital en s'écartant les unes des autres » : une molécule n'est pas vivante. Une expression correcte aurait été « les molécules reprennent leur position initiale en s'écartant les unes des autres ».

• « la vitesse de vibration » : l'expression correcte est « la fréquence de vibration ».

b. En vibrant, une corde crée des zones de surpression dans l'air proche d'elle. Ces zones de surpression se déplacent comme des vagues dans toutes les directions de l'espace. Notre oreille est sensible à ces zones de surpression.

2 a.



b. $f_3 = 3f_1$, f_1 est la fréquence du fondamental de cette corde. D'après le schéma, $l_3 = \frac{L}{3}$.

3 Les principales techniques sont :

– la corde pincée (guitare);

– la corde frottée (violin avec archet);
– la corde frappée (piano).

4 **Bilan** Les fréquences fondamentales sont les mêmes pour les trois notes. En revanche, la note de musique émise par un violon possède beaucoup plus d'autres fréquences (harmoniques) que la même note jouée par une guitare ou un piano. Les harmoniques ont tous la même durée pour le violon, alors qu'ils disparaissent progressivement pour la guitare et le piano, le fondamental ayant la durée la plus longue. Pour la guitare, plus l'harmonique est de rang élevé, plus il disparaît rapidement.

3 Les instruments à percussion (p. 92)

La plupart des instruments à percussion n'émettent pas de sons musicaux, car leur spectre en fréquences ne comprend pas un fondamental et des harmoniques dont les fréquences sont des multiples de la fréquence du fondamental.

Ce type de spectre est appelé spectre inharmonique. La représentation graphique du document 2 correspond au son d'une caisse claire. Le phénomène ne

semble pas périodique. La caisse claire de la batterie n'émet pas un son musical.

En revanche, l'oscillogramme du son correspondant à une timbale est pratiquement périodique, comme le montre le document 3. Un coup de timbale étant perçu comme plus ou moins aigu, le son d'une timbale peut être qualifié de son musical.

Pratique expérimentale

1 Modes de vibration d'une corde de guitare (p. 93)

1 Lorsque la fréquence du courant électrique est égale à $f_1 = 82$ Hz, qui correspond à la fréquence du fondamental de la corde de la guitare, cette dernière se met à vibrer en formant un fuseau. Ce fuseau est observé quel que soit le type d'excitation, soit par une force électromagnétique, soit par des ondes sonores.

Lorsque la fréquence d'excitation est $2f_1$, on observe deux fuseaux, trois fuseaux lorsque la fréquence d'excitation est $3f_1$.

2 Pour f_1 , on observe 1 fuseau; pour $f_2 = 2f_1$, on observe 2 fuseaux; pour f_n , on observe n fuseaux.

On en déduit la relation $f_n = n \cdot f_1$

3 Une guitare peut vibrer à différentes fréquences multiples d'une fréquence appelée fréquence fondamentale. Lorsque le guitariste pince la corde d'une guitare pour jouer une note, la corde vibre alors à différentes fréquences qui sont la fréquence fondamentale (la plus faible) et les fréquences harmoniques (multiples de la fréquence fondamentale).

2 La guitare : un instrument à cordes (p. 94)

1 Une guitare comporte principalement trois parties : des cordes, une caisse et un manche.

Protocole n° 1 : rôle des cordes

- ▶ Relier un microphone à un système d'acquisition informatisé.
- ▶ Paramétrer le logiciel d'acquisition.
- ▶ Pincer une corde en effectuant une acquisition.
- ▶ Faire plusieurs acquisitions en pinçant différemment la corde.
- ▶ Observer les caractéristiques des oscillogrammes obtenus.
- ▶ Procéder de même avec les autres cordes.

Protocole n° 2 : rôle de la caisse

On peut utiliser le diapason avec, puis sans sa caisse de résonance.

- ▶ Effectuer deux acquisitions, la première avec le diapason sur sa caisse de résonance et la seconde avec le diapason sans sa caisse de résonance.
- ▶ Comparer les deux oscillogrammes.

Protocole n° 3 : rôle du manche

Le manche contient des incrustations métalliques, les frettes, et le guitariste, en appuyant sur la corde entre deux frettes, modifie la longueur de vibration de celle-ci.

- ▶ Effectuer plusieurs acquisitions en faisant vibrer la corde la plus fine :
 - a. sur toute sa longueur ;
 - b. en appuyant sur la corde entre les frettes 4 et 5 ;
 - c. en appuyant sur la corde entre les frettes 11 et 12.
- ▶ Dans chaque cas, déterminer la fréquence de la note jouée.

Une corde de guitare vibre sur toute sa longueur avec la même fréquence et émet toujours la même note. Les cordes de la guitare vibrant sur toute leur longueur émettent chacune une note différente.

En appuyant entre deux frettes, le guitariste diminue la longueur de la corde. Elle vibre alors avec une fréquence supérieure, la note émise est plus aiguë. La caisse permet d'amplifier la note émise de manière audible.

3 La flûte : un instrument à vent (p. 95)

1 Le son est pur. En effet, le spectre en fréquences ne contient que le fondamental dont la fréquence est égale à $1,61 \times 10^3$ Hz. La note est proche du Sol₅ de fréquence 1568 Hz.

2 Pour calculer une incertitude de répétabilité, il faut réaliser une série de mesures.

On a réalisé six mesures de fréquences et six mesures de distances.

Ensuite, on a calculé la moyenne et l'écart type,

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (m_k - \bar{m})^2}{n-1}}, \text{ grâce à un tableur.}$$

Puis on calcule l'incertitude de répétabilité pour les séries de mesures.

L'incertitude a été établie pour les deux intervalles de confiance 95 % et 99 %.

La loi de Student donne les facteurs d'élargissement pour une série de six mesures (voir la fiche 3, p. 198 du manuel).

Pour un intervalle de confiance de 95 %, $k = 2,57$ et, pour un intervalle de 99 %, $k = 4,03$.

Mesure	1	2	3	4	5	6	Moyenne
f : fréquence La (Hz)	867	843	857	872	854	862	859,166667

Écart type : 10,2648267

Incertitude de répétabilité

Niveau de confiance 95 %	$U(f) = 10,7698367$
Niveau de confiance 99 %	$U(f) = 16,8881097$

Mesure	1	2	3	4	5	6	Moyenne
f' : fréquence Sol (Hz)	781	763	781	782	756	769	772,000000

Écart type : 11,0272390

Incertitude de répétabilité

Niveau de confiance 95 %	$U(f') = 11,5697583$
Niveau de confiance 99 %	$U(f') = 18,1424614$

Mesure	1	2	3	4	5	6	Moyenne
Distance d (cm)	14,6	14,7	14,2	14,6	14,3	14,4	14,4666667

Écart type : 0,19663842

Incertitude de répétabilité

Niveau de confiance 95 %	$U(d) = 0,20631265$
Niveau de confiance 99 %	$U(d) = 0,32351751$

Mesure	1	2	3	4	5	6	Moyenne
Distance d' (cm)	16,6	16,4	17	16	16,6	16,3	16,4833333

Écart type : 0,33714487

Incertitude de répétabilité

Niveau de confiance 95 %	$U(d') = 0,35373176$
Niveau de confiance 99 %	$U(d') = 0,55468444$

3 On calcule ensuite les rapports $r_1 = \frac{f}{f'}$ et $r_2 = \frac{d'}{d}$ à partir des valeurs moyennes des fréquences et des distances :

$$r_1 = \frac{f}{f'} = 1,11291019 \quad r_2 = \frac{d'}{d} = 1,13940092$$

L'incertitude sur les rapports est donnée par la relation :

$$U(G) = G \sqrt{\left(\frac{U(G_1)}{G_1}\right)^2 + \left(\frac{U(G_2)}{G_2}\right)^2}$$

On obtient :

$U(r_1)$	
Niveau de confiance 95 %	0,01953801
Niveau de confiance 99 %	0,03063742
$U(r_2)$	
Niveau de confiance 95 %	0,02576651
Niveau de confiance 99 %	0,0404043

4 Les valeurs des rapports se situent donc dans les intervalles $[r_1 - U(r_1); r_1 + U(r_1)]$ et $[r_2 - U(r_2); r_2 + U(r_2)]$. Nous choisissons arbitrairement d'exprimer les incertitudes $U(r_1)$ et $U(r_2)$ avec un chiffre significatif.

4 Synthétiser un son (p. 96)

1 En analysant le spectre du La₃ de la flûte traversière, on constate qu'il a un fondamental de fréquence $f_1 = 440$ Hz et quatre harmoniques de fréquence $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$ et $5f_1$. Les amplitudes de ces harmoniques diminuent lorsque le rang de l'harmonique augmente. Le spectrogramme de ce son fait apparaître un sixième harmonique, mais d'intensité très faible, car sa couleur se rapproche du violet. Sur une durée de 2,0 secondes, l'amplitude des différents harmoniques demeure constante.

On synthétise à l'aide de Scilab® un son ayant le même fondamental et les mêmes harmoniques en respectant leurs amplitudes relatives.

À l'écoute, le son synthétisé est comparable au son émis par la flûte traversière. Cependant, le son émis par la flûte va, à un moment donné, s'estomper

5 Les instruments électroniques (p. 97)

A Reproduire un son

1 Protocoles

→ Acquisition du Mi₁ d'une guitare

- ▶ Relier le microphone à un système d'acquisition informatisé.
- ▶ Réaliser l'acquisition du Mi₁.
- ▶ Tracer le spectre en fréquences du Mi₁.
- ▶ Repérer les fréquences et les amplitudes du fondamental et des harmoniques.

Les valeurs deviennent donc :

$U(r_1)$	
Niveau de confiance 95 %	0,02
Niveau de confiance 99 %	0,03
$U(r_2)$	
Niveau de confiance 95 %	0,03
Niveau de confiance 99 %	0,04

Les rapports r_1 et r_2 sont exprimés pareillement :

$$r_1 = 1,11 \quad \text{et} \quad r_2 = 1,14.$$

On obtient les intervalles suivants pour un niveau de confiance de 95 % :

- pour le rapport des fréquences : [1,09 ; 1,13] ;
- pour le rapport des distances : [1,11 ; 1,17].

On obtient les intervalles suivants pour un niveau de confiance de 99 % :

- pour le rapport des fréquences : [1,08 ; 1,14] ;
- pour le rapport des distances : [1,10 ; 1,18].

Quel que soit le niveau de confiance, 95 % ou 99 %, les intervalles se recoupent.

On peut donc affirmer que $\frac{f}{f'} = \frac{d'}{d}$.

Il y a donc un rapport simple entre la fréquence du fondamental et la longueur de la colonne d'air.

(souffle du musicien), ce qui n'est pas le cas du son synthétisé que l'on peut émettre indéfiniment. Le musicien peut également, en variant l'intensité de son souffle, faire varier l'intensité du son, ce qui n'est pas possible avec le son synthétisé.

2 Pour reproduire un son, il faut émettre son fondamental ainsi que ses harmoniques en respectant l'amplitude respective de chacun. D'après le document 9, on travaille alors dans la synthèse par modèles de signaux. Pour se rapprocher d'un son naturel émis par un instrument, il faut également être capable de tenir compte de variations de niveaux sonores, il faut reproduire l'attaque, les transitoires entre différentes notes, etc. Il faut donc modéliser les gestes et le souffle du musicien. On utilise ici la synthèse par modèles physiques, qui est beaucoup plus complexe à réaliser.

→ Reproduction du son à l'aide du générateur d'harmoniques

- ▶ Relier le générateur d'harmoniques au système d'acquisition informatisé.
- ▶ Chercher à reproduire la fréquence du fondamental. Pour cela, effectuer des acquisitions et tracer les spectres en fréquences en faisant seulement varier la fréquence du fondamental jusqu'à obtenir celle du Mi₁.
- ▶ Ensuite, effectuer des acquisitions en modifiant l'amplitude du fondamental et des harmoniques du son émis par le générateur afin d'obtenir les mêmes amplitudes que celles du spectre en fréquences du Mi₁ de la guitare.

2 Pour reproduire le son émis par un instrument, il faut synthétiser un son ayant le même fondamental et les mêmes harmoniques en respectant l'amplitude relative de chacun d'eux.

B Créer un son à l'aide d'un circuit oscillant

3 a. et b. Les tensions T et T_0 sont mesurées à l'aide d'un oscilloscope ou d'un système d'acquisition.

Si on utilise un oscilloscope, les incertitudes $U(T)$ et $U(T_0)$ sont dues à une double lecture et dépendent des graduations de l'écran de l'oscilloscope (voir fiche 3, p. 199 du manuel).

Si on utilise une acquisition informatisée, la lecture d'une période à l'écran, en zoomant sur la zone à ana-

lyser, peut être très précise. On peut donc considérer que l'incertitude liée à la lecture est principalement due à la période d'échantillonnage T_e de l'acquisition; on prendra comme incertitude de simple lecture $U_{\text{lecture}} = T_e$.

L'expression de l'incertitude de double lecture sur la période s'écrit:

$$U(T_0^2) = \sqrt{2}T_e; \quad \text{d'où } U(f_0) = \frac{\sqrt{2}T_e}{T_0^2}$$

c. Pour vérifier que f_0 est égale à f , il faut que les domaines des fréquences $[f_0 - U(f_0); f_0 + U(f_0)]$ et $[f - U(f); f + U(f)]$ aient des valeurs communes.

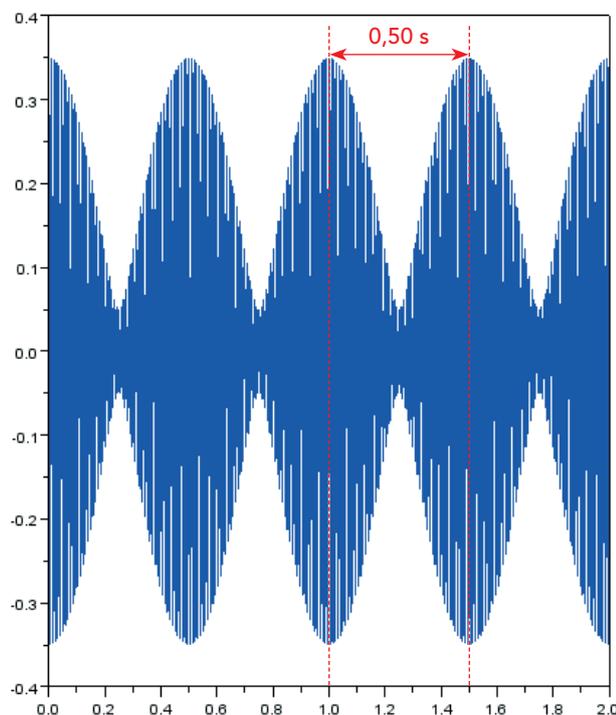
4 Un instrument électronique reproduit un son musical en créant un signal électrique de même fréquence que celle du son.

6 Accorder une guitare avec des battements (p. 98)

1 Le document ci-contre est un exemple de programme pour créer des battements. On additionne deux signaux électriques sinusoïdaux, s_1 et s_2 , correspondant aux signaux sonores émis par la corde accordée (corde La₁), de fréquence $f_1 = 110$ Hz, et par la corde à accorder (corde Mi₁ quand on appuie sur la 5^e frette), de fréquence $f_2 = 112$ Hz. On choisit arbitrairement, pour chacun de ces signaux, une amplitude proportionnelle au niveau sonore du son émis.

On crée ensuite un signal s_3 somme des deux signaux s_1 et s_2 .

Le signal s_3 obtenu a l'allure suivante :



La période des battements est de 0,50 s et sa fréquence de 2,0 Hz. La corde Mi₁, plaquée sur la 5^e frette, émet une note éloignée de 2,0 Hz de la fréquence souhaitée du La₁, qui est égale à 110 Hz.

On retrouve bien les résultats du document 14.

```
1 clear;
2 n=2; // duree-en-seconde-de-l'etude
3 fs=11000; // frq-echantillonnage
4 f1=110; // frq-de-la-corde-de-La1-accordée
5 f2=112; // frq-de-la-corde-de-Mi1-désaccordée-quand-on-appuie-sur-la-5ème-frette
6 t=soundsec(n, fs);
7 s1=0.15*cos(2*pi*f1*t); // signal-électrique-de-fréquence-f1-et-d'amplitude-0,15-V
8 s2=0.2*cos(2*pi*f2*t); // signal-électrique-de-fréquence-f2-et-d'amplitude-0,2-V
9 s3=s1+s2;
10 f=scf(0);
11 subplot(121); plot(t,s3);
12 savewave("battements2.wav",s3,fs)
```

2 On souhaite accorder la corde Mi₁ avec la corde La₁. D'après le document 16, on appuie la corde Mi₁ sur le manche entre la 4^e et la 5^e frettes. Si cette corde est accordée, en vibrant, elle émet un La₁.

On fait vibrer simultanément la corde La₁ (accordée) sur toute sa longueur et la corde Mi₁ en l'appuyant sur le manche entre la 4^e et la 5^e frettes. Si on entend des battements, la corde Mi₁ n'est pas accordée, mais a une fréquence peu éloignée de celle attendue. On tend ou détend la corde Mi₁ pour augmenter la période des battements et finir par les supprimer.

On peut également utiliser une acquisition informatisée du signal électrique correspondant aux sons émis par l'instrument. On visualise ainsi les battements. La fréquence du signal enregistré permet de savoir si la corde à accorder émet un son trop grave ou trop aigu. Dans l'exemple précédent, si le son enregistré a une fréquence de 108 Hz, alors que l'on attend 110 Hz, la corde Mi₁ émet un son dont la fréquence est trop basse (106 Hz), les battements ont une fréquence de 4 Hz (110–106). Il faut donc la tendre pour l'accorder.

On accorde les autres cordes de la guitare de la même façon.

La corde Ré₂ est accordée avec la corde La₁ lorsqu'on appuie sur la 5^e frette de cette dernière.

La corde Sol₂ est accordée avec la corde Ré₂ lorsqu'on appuie sur la 5^e frette de cette dernière.

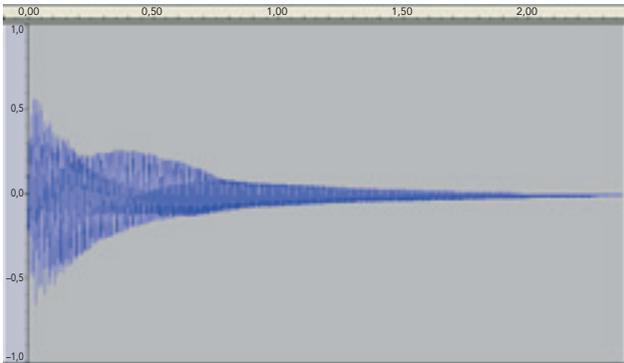
La corde Si₂ est accordée avec la corde Sol₂ lorsqu'on appuie sur la 4^e frette de cette dernière.

La corde Mi₃ est accordée avec la corde Si₂ lorsqu'on appuie sur la 5^e frette de cette dernière.

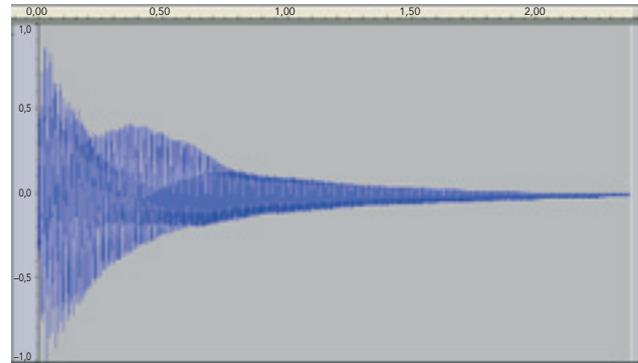
7 Le traitement du son (p. 99)

A Traitement numérique d'un son

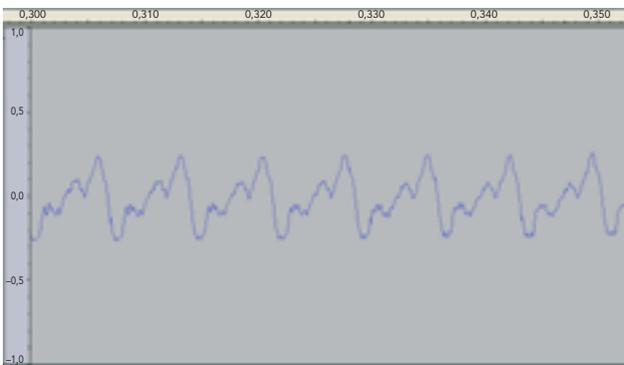
1 L'**amplification** d'un son a une conséquence sur l'amplitude du signal électrique correspondant à ce son. Plus l'amplitude du signal électrique est grande, plus le son est intense, plus son niveau sonore est élevé.



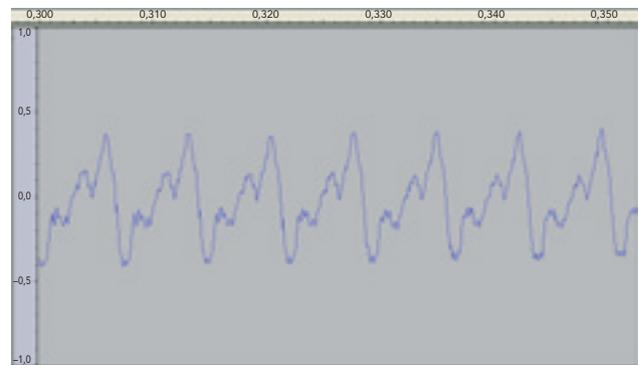
Son émis par une guitare.



Son émis par une guitare amplifié.



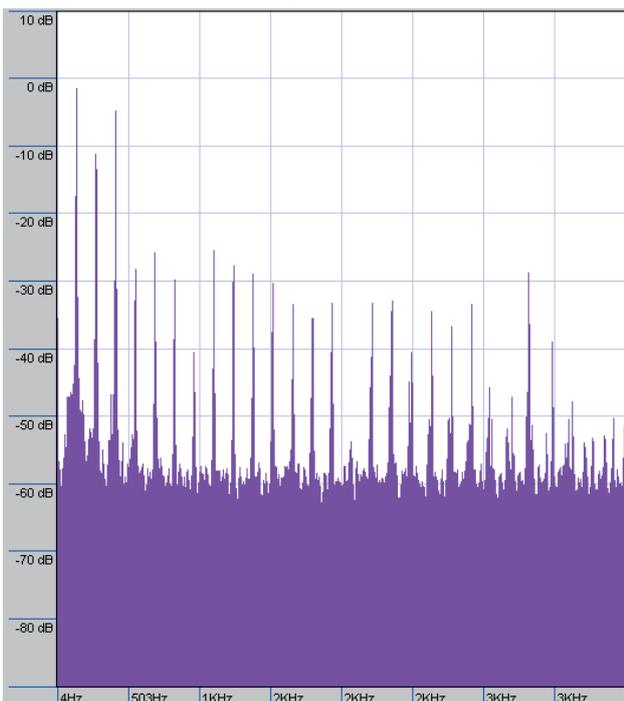
Partie du son émis par une guitare.



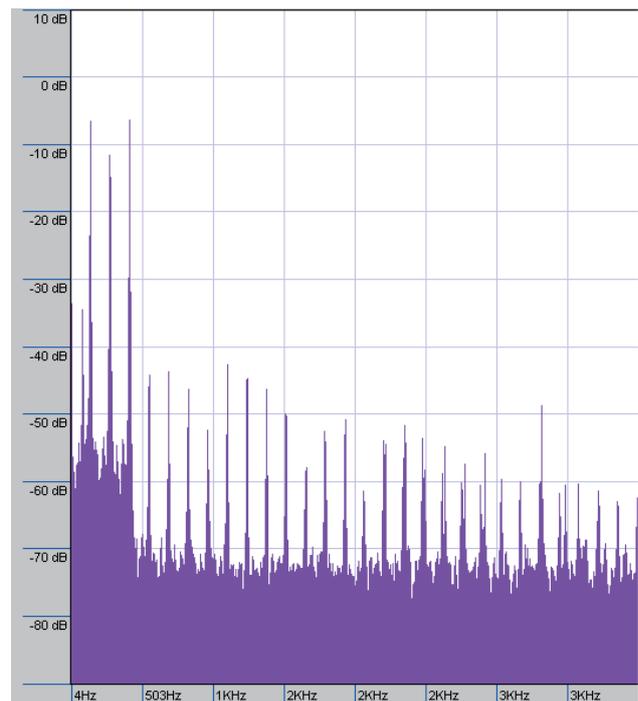
Même partie du son amplifié.

L'**égalisation** d'un son modifie son spectre en fréquences. Les fréquences du fondamental et des harmoniques gardent les mêmes valeurs ; en revanche, leurs amplitudes sont modifiées. L'allure du signal électrique correspondant à ce son est différente.

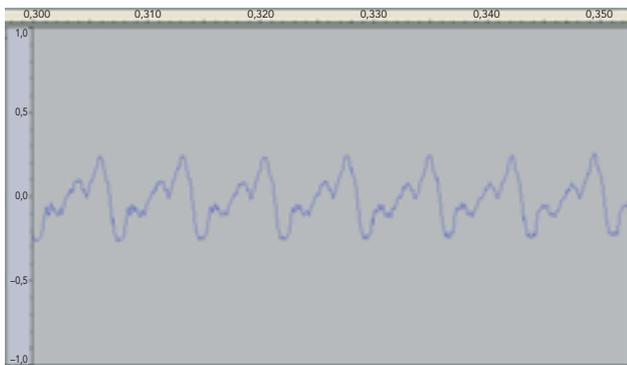
Lorsqu'un son subit une égalisation, on modifie son timbre.



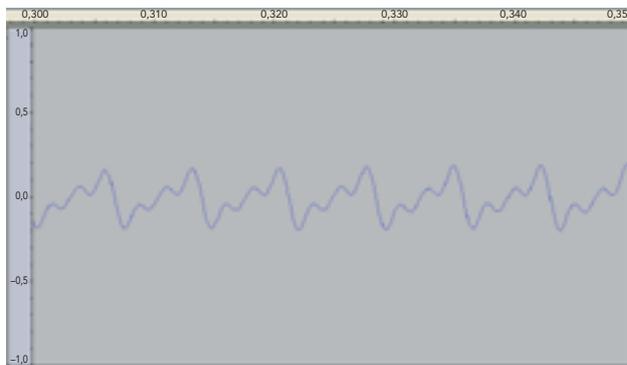
Spectre en fréquences du son émis par une guitare.



Spectre en fréquences du son égalisé. On a diminué l'amplitude des fréquences à partir de 500 Hz.

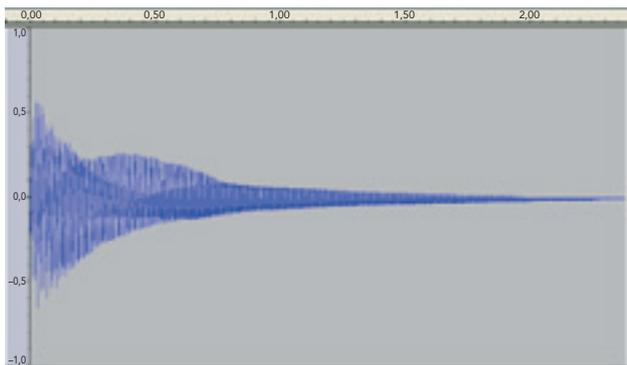


Partie du son émis par une guitare.

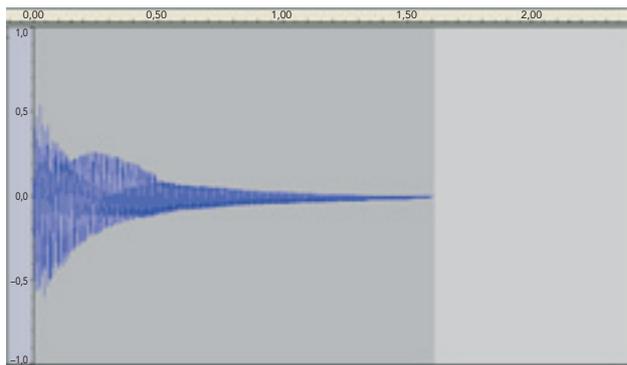


Partie du son égalisé,
le timbre n'est pas tout à fait le même.

Lorsqu'on modifie le **tempo** d'un son, la durée totale de ce son est modifiée.

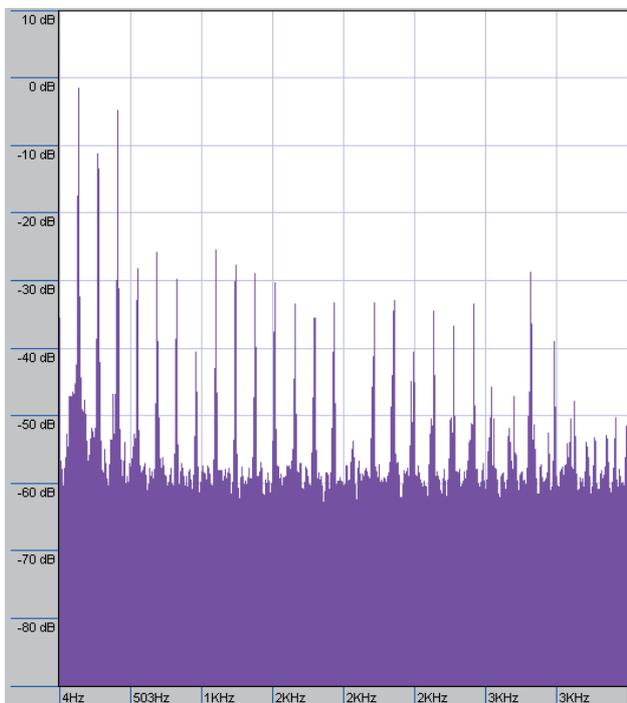


Son émis par une guitare.

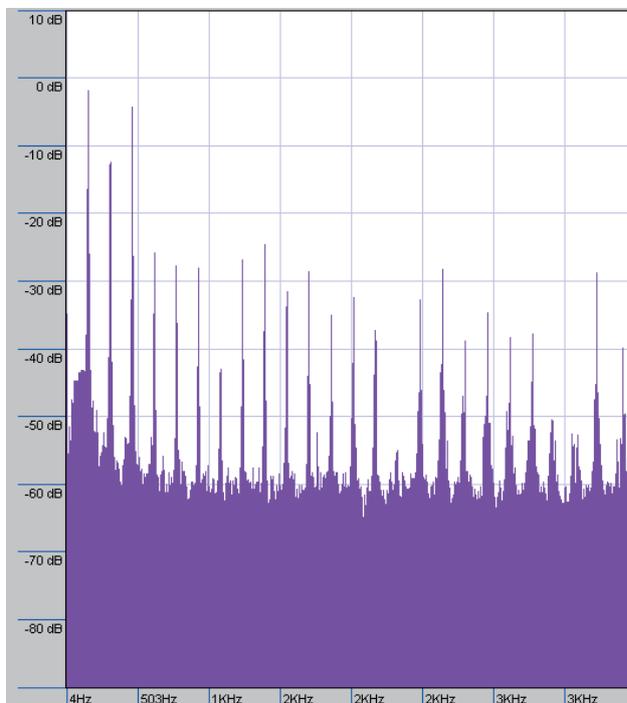


Signal correspondant au son émis par la guitare
dont on a modifié le tempo, sa durée est plus courte.

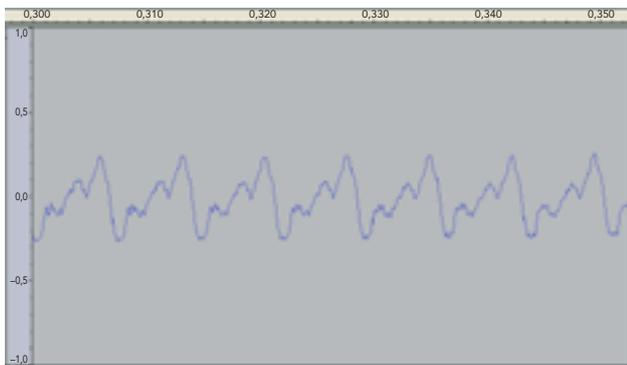
Lors d'un changement de **hauteur** d'un son, la fréquence de son fondamental et par conséquent celles de ses harmoniques est modifiée. Si elle augmente, le son est plus aigu, il est plus haut. Si la fréquence du fondamental diminue, le son est plus grave, il est plus bas.



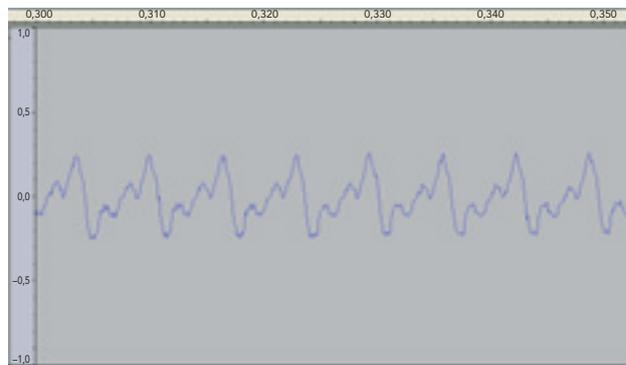
Spectre en fréquences du son émis par une guitare.



Spectre en fréquences du son
dont on a augmenté la hauteur.

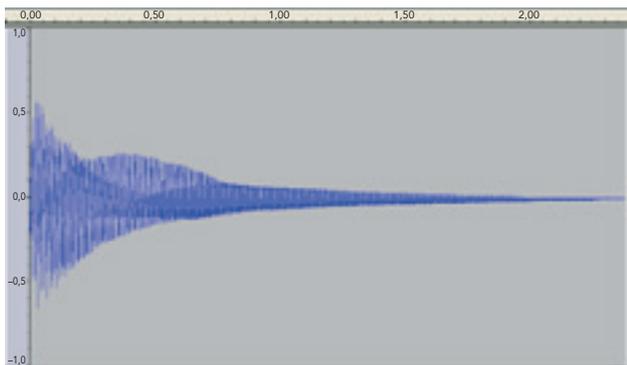


Partie du son émis par une guitare.

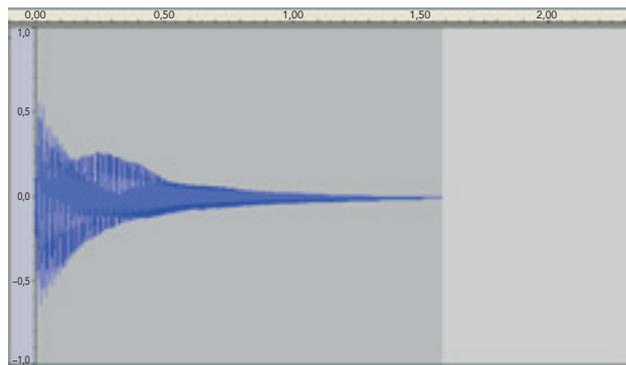


Partie du son dont on a augmenté la hauteur.

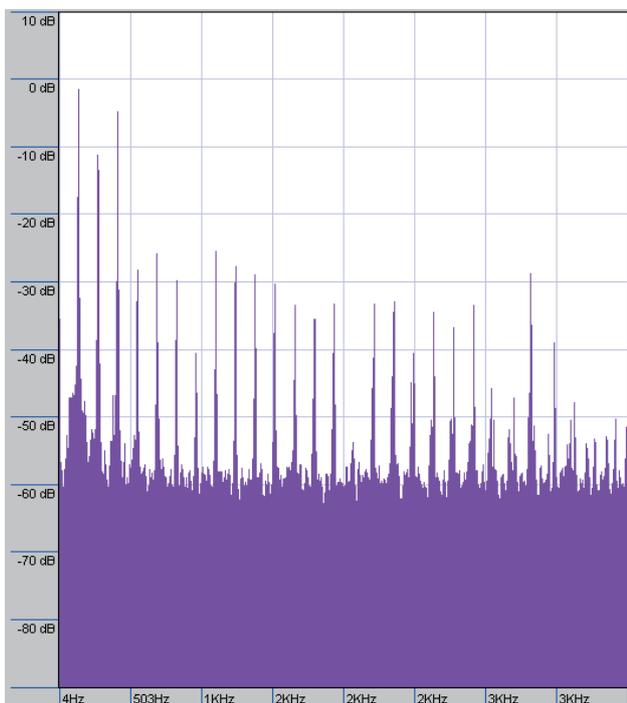
Lors d'un changement de **vitesse** d'un son, on modifie sa durée, ainsi que la fréquence de son fondamental.



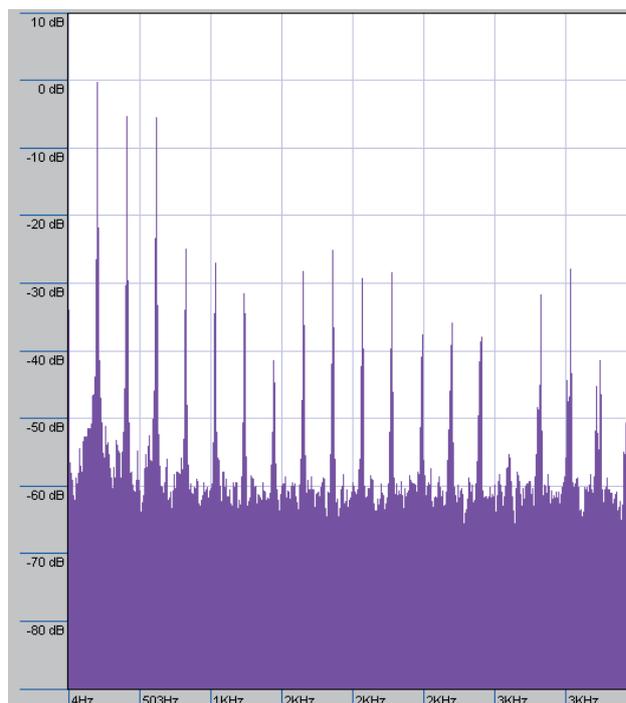
Son émis par une guitare.



Signal correspondant au son émis par une guitare dont on a modifié la vitesse : on a diminué sa durée et augmenté sa hauteur.

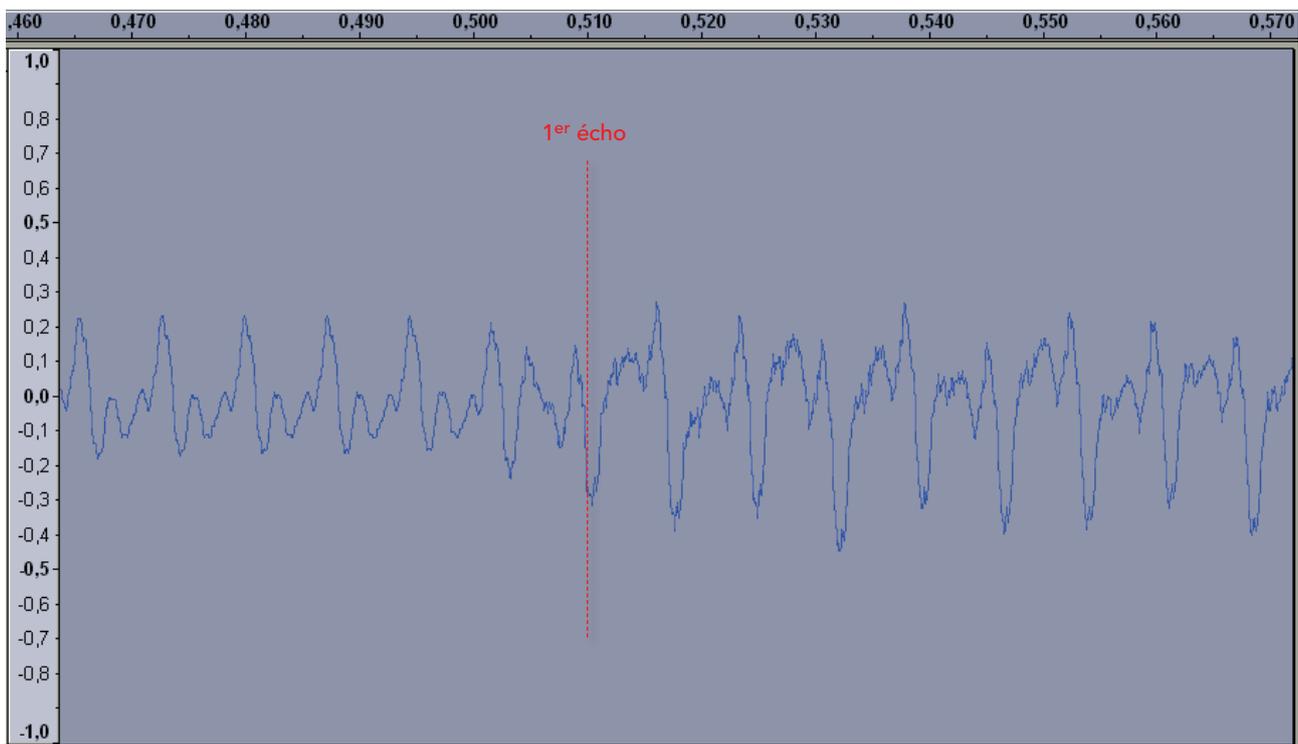
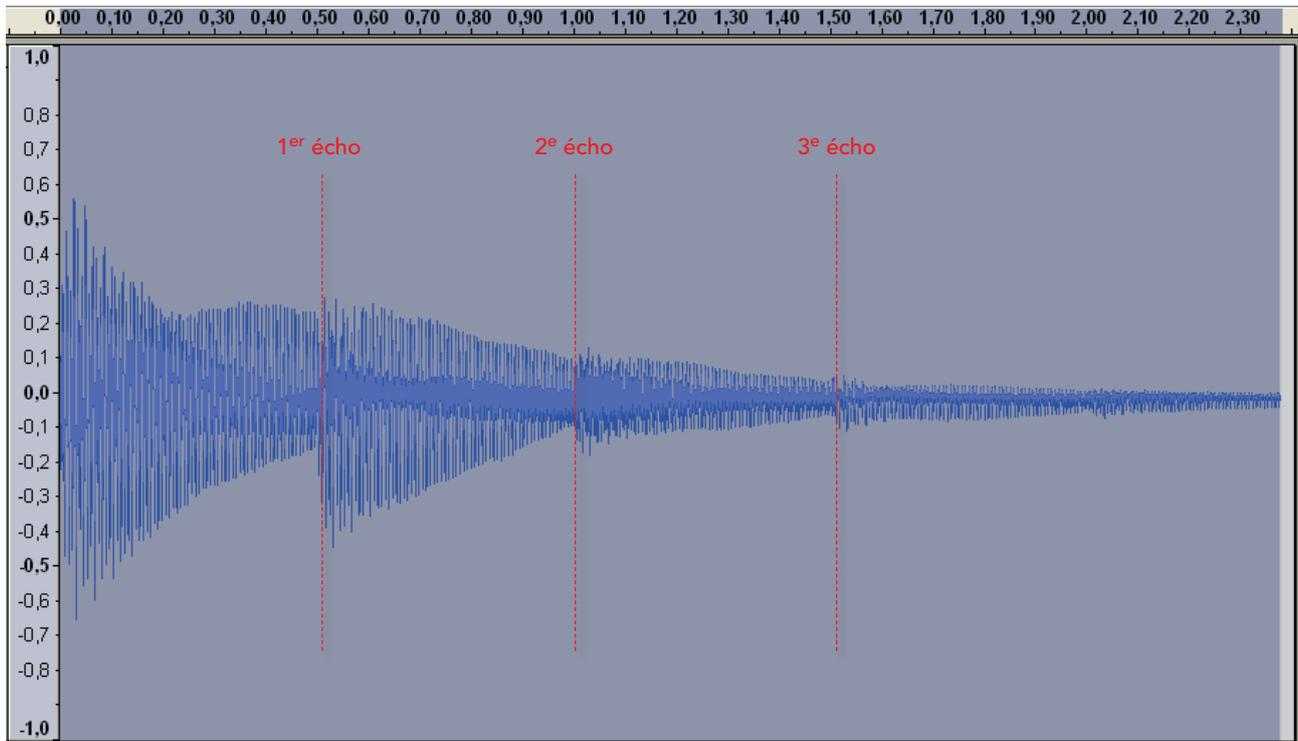


Spectre en fréquences du son émis par une guitare.



Spectre en fréquences du son dont on a augmenté la hauteur et diminué la durée.

Lors d'un **écho**, il y a émission de deux signaux ayant la même fréquence (la même hauteur) et la même allure (le même timbre). Ces deux sons sont décalés dans le temps.



Lorsqu'on supprime le **bruit**, le signal électrique correspondant au son est légèrement modifié, son spectre en fréquences ne contient que le fondamental et les harmoniques de ce son.

B Traitement électronique d'un son

2 a. Le timbre du son traité est modifié. Les harmoniques de ce son ayant des fréquences supérieures à la fréquence de coupure f_c sont très atténués ou supprimés.

Ce traitement permet d'égaliser le son.

b. Le montage porte le nom de filtre « passe-bas », car il ne laisse passer que les signaux électriques ayant des fréquences inférieures à la fréquence de coupure. Il ne laisse passer que les basses fréquences, du moins plus basses que la fréquence de coupure.

2 L'harmonie selon le Père Blaise (p. 102)

1. Une octave est définie comme un intervalle de sons musicaux dont les fréquences limites sont dans un rapport de 2. La fréquence d'un Do_3 est égale à deux fois la fréquence d'un Do_2 , ces deux notes étant séparées d'une octave. Dans la gamme tempérée, l'octave est divisée en douze intervalles égaux appelés demi-tons. Deux notes séparées d'une octave sont séparées de 12 demi-tons.

Une quinte juste est définie comme un intervalle de sons musicaux dont les fréquences limites sont dans un rapport de $3/2$. Dans la gamme tempérée, le La_2 , de fréquence 220 Hz, est à la quinte du Ré_2 , de fréquence 147 Hz. Ces deux notes et de façon générale deux notes à la quinte sont séparées de 7 demi-tons.

Une tierce majeure est définie comme un intervalle de sons musicaux de 4 demi-tons et dont les fréquences limites sont dans un rapport de $5/4$.

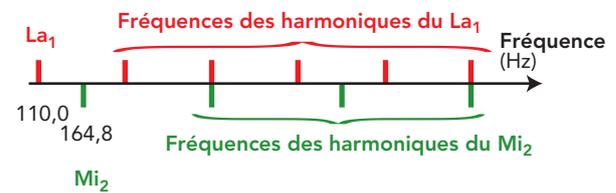
On parle d'harmonie entre deux sons lorsque le rapport des fréquences de leur fondamental est simple. Certains harmoniques de ces deux sons sont communs. Plus il y a d'harmoniques communs entre ces deux sons, plus ils sont harmonieux.

Un son correspondant à un Fa_2 dont le fondamental a une fréquence $f_{\text{Fa}_2} = 174,6$ Hz dans la gamme tempérée peut avoir des harmoniques de fréquences égales à $2f_{\text{Fa}_2}$, $3f_{\text{Fa}_2}$, $4f_{\text{Fa}_2}$, etc.

Le Fa_3 à l'octave du Fa_2 a un fondamental de fréquence $2f_{\text{Fa}_2} = 349,2$ Hz et des harmoniques de fréquences égales à $4f_{\text{Fa}_2}$, $6f_{\text{Fa}_2}$, etc.

Le fondamental et tous les harmoniques du Fa_3 ont des fréquences de valeurs identiques à celles de certains harmoniques du Fa_2 . Ces deux sons sont très harmonieux.

Si on représente le fondamental et les harmoniques de deux sons à la quinte juste l'un de l'autre, par exemple, le La_1 dont la fréquence du fondamental est de 110 Hz et le Mi_2 dont la fréquence du fondamental est de 164,8 Hz, on constate que le 3^e et le 6^e harmoniques du La_1 ont les mêmes fréquences que les 2^e et 4^e harmoniques du Mi_2 . Ces deux sons à la quinte sont harmonieux. L'harmonie est moins importante que pour deux notes à l'octave, car elles ont moins d'harmoniques en commun.



Par un raisonnement analogue, deux notes séparées d'une tierce majeure ont en commun le 5^e harmonique de la note la plus basse et le 4^e de la note la plus haute.

2. On réalise l'acquisition de plusieurs sons à l'aide d'un microphone et d'une carte d'acquisition, par exemple. On compare leurs spectres en fréquences. Si les spectres en fréquences ont des harmoniques en commun (de même fréquence), les sons correspondant à ces spectres sont harmonieux.

3 Instruments à percussion (p. 103)

Il faut enregistrer le son de l'instrument à percussion avec un échantillonneur également appelé *sampler*. Il faut ensuite «pitcher le son à l'octave autant que nécessaire», c'est-à-dire multiplier par deux sa fréquence autant que nécessaire, puisque deux notes sont séparées d'une octave lorsque le rapport de leurs fréquences fondamentales est égal à 2.

C'est l'échantillonneur qui permet d'augmenter la hauteur du son enregistré.

Lorsqu'on obtient un son dont la fréquence est repérable sur la gamme tempérée, on ajuste cette dernière en tendant la peau si la fréquence est trop faible ou en la détendant si la fréquence a une valeur trop élevée.

4 Instruments à vent (p. 104)

Problème 1

La fréquence du son musical joué dépend de la longueur de la colonne d'air.

Dans un clairon, cette longueur n'est pas modifiable. On ne devrait pouvoir jouer qu'une seule note de fréquence $f_1 = 131$ Hz. Cette note est en fait difficile à obtenir. En jouant sur la tension des lèvres, on peut obtenir plus facilement les deux harmoniques suivants de fréquences $f_2 = 2f_1 = 262$ Hz et $f_3 = 3f_1 = 393$ Hz. Avec un clairon, on peut donc jouer deux notes, un Do_3 de fréquence $f_2 = 262$ Hz et un Sol_3 de fréquence $f_3 \approx 392$ Hz.

En revanche, grâce aux pistons et aux coulisses, la longueur de la colonne d'air est modifiable dans une trompette. En appuyant sur un piston de la trompette, on augmente la longueur de la colonne d'air, cette augmentation n'étant pas la même d'un piston à l'autre. Il existe donc 8 longueurs de la colonne d'air présentées dans le tableau ci-dessous (on note 1 lorsque le piston est enfoncé et 0 lorsqu'il est relevé) :

Piston 1	0	1	0	0	1	1	0	1
Piston 2	0	0	1	0	1	0	1	1
Piston 3	0	0	0	1	0	1	1	1

Problème 2

Lorsque l'on joue un Sol₃ avec une trompette, la longueur totale de la colonne d'air (de l'embouchure au pavillon) a pour expression $L = L_{\text{Sol}_3} = \frac{v}{2f_{\text{Sol}_3}}$.

Lorsque l'on joue un Fa₃ :

$$L_{\text{Fa}_3} = \frac{v}{2f_{\text{Fa}_3}} = \frac{L \cdot f_{\text{Sol}_3}}{f_{\text{Fa}_3}} = \frac{392}{349}L \approx 1,12L = L_{\text{coul}_2} + L$$

La deuxième coulisse doit avoir une longueur égale à $L_{\text{coul}_2} = 0,12 L$, soit 12 % de la longueur totale L de la trompette.

Lorsque l'on joue un Mi₃ :

$$L_{\text{Mi}_3} = \frac{v}{2f_{\text{Mi}_3}} = \frac{L \cdot f_{\text{Sol}_3}}{f_{\text{Mi}_3}} = \frac{392}{330}L \approx 1,19L = L_{\text{coul}_3} + L$$

La troisième coulisse doit avoir une longueur égale à $L_{\text{coul}_3} = 0,19L$, soit 19 % de la longueur totale L de la trompette.

Remarque : les longueurs relatives sont en accord avec la photographie de la trompette : la 3^e coulisse est plus longue que la 2^e. La note émise en appuyant sur le 3^e piston est plus grave que celle émise en appuyant sur le 2^e piston, car la colonne d'air est plus longue.

Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 Critères de qualité acoustique d'une salle (p. 106-107)

1 a. Les phénomènes physiques intervenant dans la propagation d'un son dans une salle sont la diffusion, la réflexion, la réfraction, la diffraction et l'absorption. Un auditeur reçoit alors la superposition de plusieurs contributions (le son direct, le son réfléchi sur les différentes structures de la salle, etc.) avec un décalage dans le temps.

La *diffusion* est la modification de la direction de propagation du son dans tout l'espace, sans direction privilégiée.

La *réflexion* est la modification de la direction de propagation du son dans une direction privilégiée.

La *réfraction* est la modification de la direction de propagation du son par modification du milieu de propagation.

La *diffraction* est la modification de la direction de propagation du son lorsqu'il rencontre un obstacle ou un interstice de l'ordre de grandeur de sa longueur d'onde. Cette modification est sélective : la fréquence diffractée dépend de la taille des éléments.

L'*absorption* est la diminution de l'intensité sonore lors de la propagation dans un milieu. Cet effet affecte différemment les différentes fréquences selon la nature des matériaux.

b. La diffusion et l'absorption par les différents matériaux dans lesquels le son se propage sont responsables de la décroissance de l'intensité sonore.

c. Le son est de plus en plus difficilement perçu par l'auditeur lorsque l'intensité sonore diminue.

2 a. Un *ovoïde* est une figure de forme ovale.

Les *moulures* sont des éléments d'ornement. Les *cariatides* sont des statues de femmes jouant le rôle de colonnes, par exemple, dans les théâtres. Les *stucs* sont des enduits teintés recouvrant plafonds, murs, etc.

L'expression « *La quadrature du cercle* » fait référence à un problème insoluble.

L'*abat-son* désigne l'ensemble des lames inclinées de haut en bas et de dedans en dehors et fixées dans un châssis en charpente (source : Wikipédia).

b. Il est expliqué dans le document 1 que tous les éléments de symétrie de la salle nuisent à son acoustique à cause du phénomène de réflexion. Dans ce contexte, la phrase « La boîte à chaussures est une forme de départ idéale » peut sembler contradictoire. En effet, une boîte à chaussures, parallélépipédique, comporte un grand nombre d'éléments de symétrie ; c'est donc une forme peu propice initialement à une bonne acoustique.

L'expression « de départ » nuance cette première impression de contradiction : pour améliorer l'acoustique d'une salle, il convient de rajouter des éléments d'architecture permettant de rompre les symétries (balcons, panneaux inclinés, etc.). La géométrie très simple de la boîte à chaussures facilite la prévision des effets lors de l'ajout de ces différents éléments. C'est donc la forme de départ idéale pour l'anticipation et les calculs d'acoustique lors de l'aménagement.

3 La réverbération du son est liée à sa réflexion sur les différents éléments d'architecture de la salle. Elle a pour conséquence le prolongement dans le temps du son émis par une source. Dans le cas d'un orateur, si la réverbération de la 1^{re} syllabe se superpose à l'émission de la 2^e, et ainsi de suite, le texte prononcé peut devenir incompréhensible, et ce d'autant plus que le temps de réverbération sera plus long.

4 La durée de réverbération dépend du volume et de la surface d'absorption équivalente de la salle.

5 Bilan Pour une bonne acoustique d'une salle, il faut tenir compte de son usage, de sa forme, de son volume, de sa surface et de la nature des matériaux qui constituent les parois.

Selon l'usage de la salle, le temps de réverbération optimal n'a pas la même valeur : il est plus grand pour des salles de spectacles ou de concert que pour des salles de conférences. La réverbération qui prolonge la durée d'un son est particulièrement attendue pour de la musique, mais peut nuire à la compréhension de la parole. Selon l'usage, il convient donc de disposer de salles de différentes conceptions.

2 L'acoustique des théâtres antiques (p. 108-109)

1 a. Pour améliorer l'acoustique des théâtres, Vitruve s'appuie sur les phénomènes de réflexion sur des parois ou des éléments de décoration architecturale, de diffraction dans des cavités.

b. Le document 2 met en évidence le filtrage du bruit de fond grâce à la géométrie périodique des gradins et des marches. Le phénomène concerné semble être le phénomène d'interférences (destructives pour le filtrage, constructive pour le renforcement de certaines fréquences). Néanmoins, l'étude menée concerne un théâtre vide. La présence de spectateurs peut modifier ces effets.

2 a. Pour confirmer l'hypothèse concernant l'existence d'interférences, il faudrait, avec le dispositif du professeur CANAC, émettre des ultrasons (de longueur d'onde en rapport avec l'échelle de la maquette) à partir d'une source située sur la scène et mesurer l'intensité sonore reçue par un récepteur en différents points de la maquette.

Il faudrait aussi répéter les mesures pour des fréquences différentes et cartographier le théâtre en fonction de l'intensité sonore reçue en différents points.

Pour montrer l'influence de la périodicité des marches, il serait nécessaire de disposer de maquettes comportant des gradins de hauteurs différentes et remettre en œuvre le protocole précédent.

b. Si l'hypothèse de Nico DECLERCO et Cindy DEKEYSER est confirmée, avec les dispositifs du Pr. CANAC, ils devraient observer que les fréquences filtrées dépendent de la hauteur des gradins.

3 L'auteur du document 4 conteste la validité des expériences faites dans des théâtres vides du fait de la non prise en compte de la nature des revêtements aujourd'hui détruits, ainsi que de la présence des spectateurs qui modifie, selon lui, les propriétés acoustiques de façon non négligeable.

Pour en faire l'étude, il faudrait habiller les sièges de la maquette de dispositifs simulant la présence de spectateurs (matières absorbantes équivalentes au corps humain).

4 Bilan La géométrie du théâtre, les éléments de symétrie, la présence de revêtements, de vases et de cavités à différents endroits contribuent à l'acoustique des théâtres antiques.

3 Matériaux actifs (p. 110-111)

1 Un son pur signifierait qu'il n'est constitué que d'une onde sonore sinusoïdale; le texte veut parler de son perçu avec netteté.

2 Les adjectifs « active » et « passive » associés au nom « acoustique » renseignent sur l'intervention ou non de dispositifs électroniques.

L'acoustique passive s'appuie sur les propriétés intrinsèques de la salle (sa géométrie, les matériaux qui en composent les parois, etc.) et les phénomènes naturels liés à la propagation du son dans un espace clos.

L'acoustique active a recours à des dispositifs de sonorisation (microphones, haut-parleurs) qui captent et rediffusent à différents endroits les sons de la salle pour simuler des réflexions.

3 En modifiant les réglages du mur actif, on modifie la valeur des coefficients d'absorption acoustique du mur, donc la surface équivalente d'absorption de la salle et ainsi, la durée de réverbération de la salle.

4 Bilan L'acoustique active est qualifiée de procédé révolutionnaire, car elle permet de régler l'acoustique d'une salle en fonction du spectacle qui s'y déroule grâce à l'incrustation dans les murs de petits microphones et d'enceintes électroniquement pilotés depuis la régie.

Les microphones disséminés dans la salle captent le champ sonore et un réseau de haut-parleurs commandés électroniquement permet de faire varier la durée de réverbération selon l'ambiance souhaitée.

Une même salle peut alors posséder des qualités acoustiques adaptées à une salle de conférence, une salle de sport ou un opéra. Ce procédé évite de lourds et coûteux mécanismes de panneaux amovibles utilisés jusque là pour qu'une même salle puisse accueillir diverses manifestations.

Il reste à vérifier que l'ambiance acoustique artificiellement créée est vraiment comparable à celle des salles dédiées.

4 Isolation phonique (p. 112-113)

1 Le principal phénomène physique mis en jeu lors de la limitation de la transmission du bruit (onde sonore non désirée) est l'absorption.

Pour augmenter l'isolation phonique d'un bâtiment, on peut intervenir sur la nature, la géométrie et l'épaisseur des matériaux constituant ses parois afin d'augmenter l'absorption de l'énergie acoustique.

2 Bilan Une salle sourde (chambre anéchoïque) absorbe totalement les sons produits à l'intérieur lorsque leur fréquence est supérieure à une valeur limite, appelée fréquence de coupure. Les parois internes sont alors totalement absorbantes.

Ces chambres servent dans le cadre de la réalisation de mesures dans lesquelles toute présence de nuisance sonore doit être évitée.

Pratique expérimentale

1 Isolation phonique (p. 114-115)

1 L'intensité sonore du son émis est maximale à la sortie immédiate du buzzer ; elle vaut par exemple :

$$I_{\max} = 3,16 \cdot 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2},$$

soit un niveau d'intensité sonore de 105 dB.

2 Une atténuation de 5 dB signifie que le niveau d'intensité sonore à la distance recherchée a diminué de 5 dB par rapport à sa valeur en sortie immédiate du buzzer :

$$L_{\max} - L = 10 \left(\log \left(\frac{I_{\max}}{I_0} \right) - \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \right) = 10 \log \left(\frac{I_{\max}}{I} \right) = 5 \text{ dB}$$

$$\text{d'où } \frac{I_{\max}}{I} = 10^{(L_{\max} - L)/10} \text{ et } I = I_{\max} \cdot 10^{-(L_{\max} - L)/10}$$

Par lecture graphique sur la courbe représentative de $I = f(d)$, on lit, par exemple, la distance 4,6 cm.

3 Le meilleur isolant acoustique est celui pour lequel on mesure l'intensité sonore la plus faible derrière lui. On obtient le classement :

plâtre > contreplaqué > polystyrène.

Cela vérifie la loi des masses.

4 Le meilleur matériau ressort est celui pour lequel on mesure l'intensité sonore la plus faible. Il s'agit du polystyrène entre les plaques de plâtre.

5 Les sources d'erreur à prendre en compte sont celles liées aux mesures des distances, des épaisseurs, des intensités sonores et des fréquences.

6 Pour éviter des problèmes de résonance qui amplifieraient le bruit au lieu de l'atténuer, on utilise des vitres d'épaisseurs différentes.

2 Réduction des bruits des transports (p. 116-117)

1 Plus l'amplitude de l'onde sonore reçue après traversée du matériau est faible par rapport à celle de l'onde émise, plus le matériau est absorbant.

Plus l'amplitude de l'onde sonore reçue après réflexion sur le matériau est grande par rapport à celle de l'onde émise, plus le matériau est réfléchissant.

On obtient le classement :

bois > polystyrène > feutrine,

où « > » signifie « plus réfléchissant que ».

2 Le phénomène de diffraction peut expliquer la perception d'un son derrière un mur antibruit. La diffusion et la réflexion peuvent aussi l'expliquer si une paroi est convenablement placée par rapport à l'émetteur et au récepteur.

3 a. L'atténuation n'est pas proportionnelle à la différence de marche entre le chemin direct (de longueur d_3) sans écran et le trajet diffracté (de longueur $d_1 + d_2$), car pour $N = 0$, $A \neq 0$ dB.

b. D'après la relation $N = \frac{2}{\lambda} (d_1 + d_2 - d_3)$, plus la longueur d'onde est grande et plus N est petit (toutes choses égales par ailleurs). Comme A évolue dans le même sens que N , les sons graves seront moins atténués que les sons aigus.

4 Outre la nature du matériau du mur, sa hauteur et son épaisseur peuvent influencer son efficacité. La présence d'autres parois réfléchissantes ou diffusantes doit aussi être prise en compte.

2 Écho créé par un mur de scène (p. 120)

Le son direct va de A en S et a parcouru la distance AS, avec une vitesse de valeur constante, en une durée :

$$\Delta t_d = \frac{AS}{v}$$

L'écho part de S pour arriver en A après s'être réfléchi sur le mur de la scène, il a parcouru la distance AS + 2d, avec la même valeur constante de vitesse, en une durée :

$$\Delta t_e = \frac{AS + 2d}{v}$$

Le retard entre l'écho et le son direct doit être inférieur à une durée de 1/25 seconde pour que le son reste net.

Ainsi, $\Delta t_e - \Delta t_d < \frac{1}{25}$ s'écrit $\frac{2d}{v} < \frac{1}{25}$,

soit : $d < \frac{v}{50}$

AN : $d < \frac{340}{50}$

$d < 6,8 \text{ m.}$

La profondeur maximale de la scène, pour que la parole ne soit pas perturbée par l'écho, est de 6,8 m.

3 Coefficient d'absorption acoustique (p. 120)

■ L'énoncé donne le TR attendu, donc à partir de la formule de Sabine, $TR = 0,16 \times \frac{V}{A}$, il est possible de calculer la surface équivalente d'absorption de la salle, A :

$$A = 0,16 \times \frac{V}{TR}$$

Le volume de la salle, V, est exprimé en fonction de la longueur, de la largeur et de la hauteur de la salle :

$$V = L \cdot l \cdot H$$

Donc : $A = 0,16 \times \frac{L \cdot l \cdot H}{TR}$

AN : $A = 0,16 \times \frac{15 \times 10 \times 3,2}{2,2} = 35 \text{ m}^2$.

La surface équivalente d'absorption de la salle est de 35 m².

■ Pour déterminer le coefficient d'absorption acoustique α_2 du matériau avec lequel il faut recouvrir le plafond, on utilise la relation $A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i$.

Dans cette relation, on prend en compte les murs et le plafond puisque, comme indiqué par le texte, l'absorption du sol est négligée, donc :

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2$$

soit : $\alpha_2 = \frac{A - \alpha_1 \cdot S_1}{S_2}$

S_1 est la surface des murs et S_2 celle du plafond :

$$S_1 = (15 + 15 + 10 + 10) \times 3,2 = 160 \text{ m}^2$$

et $S_2 = 15 \times 10 = 150 \text{ m}^2$.

AN : $\alpha_2 = \frac{35 - 0,20 \times 160}{150} = 0,02$.

Le coefficient d'absorption acoustique du matériau recouvrant le plafond doit être de 0,02.

■ Dans une salle de réunion, on cherche un temps de réverbération plus faible que dans une salle de concert, le matériau utilisé doit donc avoir un coefficient d'absorption plus grand. Ce résultat est confirmé par les formules utilisées ci-dessus.

À un plus faible TR correspond une surface équivalente d'absorption de la salle plus grande et donc,

d'après la relation $\alpha_2 = \frac{A - \alpha_1 \cdot S_1}{S_2}$, une valeur de α_2 plus grande.

4 Transformer un réfectoire en salle de spectacles (p. 121)

On cherche une durée de réverbération $TR = 1,6 \text{ s}$.

Le volume de la salle est

$$V = L \cdot l \cdot H = 12 \times 6,0 \times 2,5 = 180 \text{ m}^3$$

D'après la formule de Sabine :

$$A = 0,16 \times \frac{V}{TR} = 0,16 \times \frac{180}{1,6} = 18 \text{ m}^2$$

Pour transformer cette salle en salle de spectacles, il faut une surface équivalente d'absorption de 18 m².

La surface équivalente d'absorption, A_v , de la salle en l'absence de panneaux en bois se détermine en tenant compte des parois qui la constituent :

Paroi	Plafond	Sol	Mur	Porte	Vitre	Chaise
S (m ²)	72	72	60	4,0	26	100
$\alpha_M \cdot S_i$ (m ²)	2,16	1,44	1,2	0,60	4,68	0,8

$$A_v = 2,16 + 1,44 + 1,2 + 0,6 + 4,68 + 0,8 = 11 \text{ m}^2$$

Avec les panneaux, la surface équivalente d'absorption est : $A = A_v + 0,20 \times S_{\text{panneaux}}$

soit : $S_{\text{panneaux}} = \frac{A - A_v}{0,02} = \frac{18 - 11}{0,02} = 35 \text{ m}^2$.

Chaque panneau possède une surface de 2,0 m²; il faut donc 18 panneaux pour obtenir la durée de réverbération souhaitée.

5 Aménagement d'un auditorium (p. 121)

Il faut déterminer la surface d'absorption équivalente :

$$A = 120 \cdot \alpha_M + \alpha_p \cdot (L \cdot \ell) + \alpha_S \cdot (L \cdot \ell) + N \cdot A_{\text{sièges}}$$

où N est le nombre de sièges.

$$V = L \cdot \ell \cdot h; \quad \text{soit } L \cdot \ell = \frac{V}{h} = \frac{200}{4,0} = 50 \text{ m}^2$$

Par suite :

$$A = 120 \times \alpha_M + 0,050 \times 50 + 0,080 \times 50 + 25 \times 0,50 \\ = 120 \times \alpha_M + 19$$

La durée de réverbération imposée au niveau des murs conduit à une condition sur la surface d'absorption équivalente :

$$0,16 \times \frac{V}{0,50} \leq A \leq 0,16 \times \frac{V}{0,30}$$

ou $64 \text{ m}^2 \leq A \leq 1,1 \times 10^2 \text{ m}^2$.

Par suite : $0,38 \leq \alpha_M \leq 0,73$.

En comparant aux valeurs données, il semble que les isolants n° 2 et n° 3 conviennent.

Pour savoir lequel est le plus avantageux, il faut calculer le prix de revient au mètre :

– pour l'isolant n° 2, $\frac{425}{12,5} = 34 \text{ €}$;

– pour l'isolant n° 3, $\frac{850}{25} = 34 \text{ €}$.

Ces deux isolants auront donc le même coût et les mêmes propriétés acoustiques. À part un autre critère (couleur, qualité, etc.), rien ne les différencie au niveau du cahier des charges.

6 Critères de choix d'un matériau (p. 122)

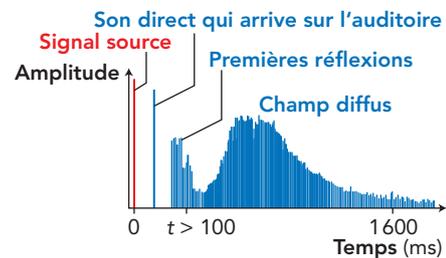
1. Selon le matériau utilisé dans la paroi, on modifie la durée de réverbération de la pièce contenant la source sonore, mais aussi celle de la pièce de l'autre côté de la paroi.

De plus, la paroi atténue l'intensité sonore dans la pièce adjacente. Cette atténuation dépend du matériau de la paroi et aussi de la fréquence du son.

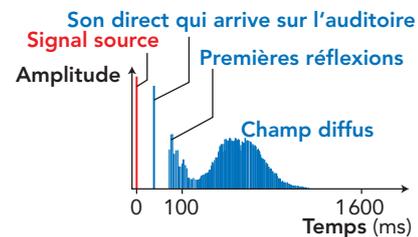
Ainsi, selon l'utilisation recherchée d'une pièce, on choisit un matériau adapté à la durée de réverbération voulue et à l'utilisation de la pièce adjacente attendue.

2. La réponse impulsionnelle dépend de la distance entre l'émetteur et le récepteur. Plus cette distance augmente et plus le son direct met longtemps à arriver au récepteur. Elle dépend aussi de la puissance de l'émetteur (amplitude plus ou moins grande) et des matériaux qui constituent les parois (amplitude des premières réflexions et du champ diffus, durée d'extinction).

Cas où le récepteur s'éloigne de l'émetteur :

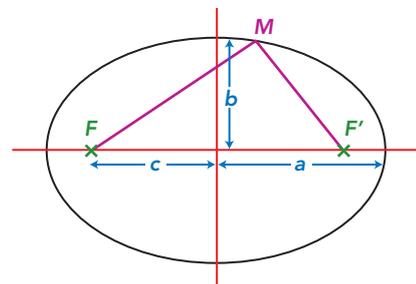


Cas où les matériaux sont plus absorbants :



7 Quand les galeries chuchotent (p. 123)

Ces deux documents illustrent les propriétés géométriques d'une ellipse. Une onde sonore émise depuis un foyer F (ou F') de l'ellipse se réfléchit sur les parois de l'enceinte de forme elliptique en passant par l'autre foyer de l'ellipse F' (ou F) (voir le schéma ci-contre).



Cycle de vie des matériaux

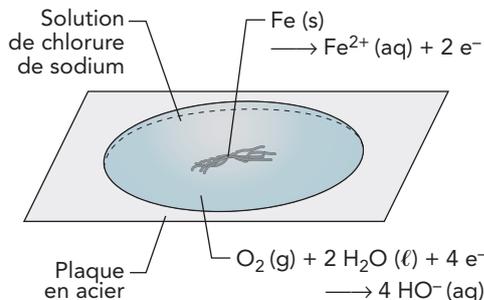
Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 La vie des aciers (p. 130-131)

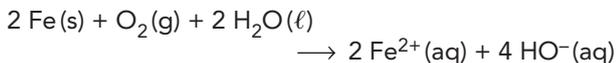
1 Dans un haut-fourneau, les oxydes de fer sont réduits en métal fer; le bois constituait le réducteur des premiers métallurgistes. Le bois apportait l'élément carbone qui, au cours de la réaction, était oxydé en dioxyde de carbone.

2 La ferraille contient du fer et des oxydes de fer; la fonte est plus riche que l'acier en élément carbone, une partie du carbone de la fonte réduit les oxydes de la ferraille et se transforme en dioxyde de carbone. Le taux global de carbone diminue dans le mélange qui devient ainsi de l'acier (voir les taux de carbone de la fonte et de l'acier dans le document 2). L'ajout éventuel de dioxygène permet d'ajuster la transformation d'une partie du carbone de la fonte en dioxyde de carbone et d'obtenir de l'acier.

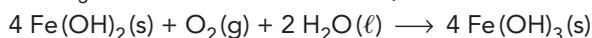
3 a. Le schéma de l'expérience modélisant la corrosion peut être le suivant :



L'équation de la réaction qui se produit est :



En fait, la circulation en sens inverse des ions Fe²⁺ (aq) et HO⁻ (aq) conduit à la formation d'un précipité verdâtre d'hydroxyde de fer(II), Fe(OH)₂(s), qui brunit lentement par formation de l'hydroxyde de fer(III), Fe(OH)₃(s), suivant la réaction d'équation :



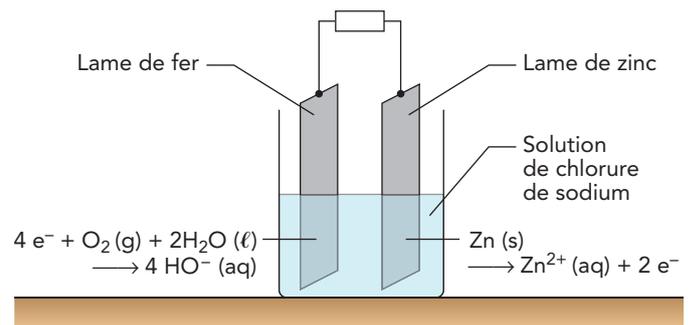
b. Le transfert d'électrons ne se fait pas directement par contact entre les réactifs puisque l'oxydation du fer et la réduction du dioxygène a lieu en deux sites différents.

Le transfert d'électrons se fait par l'intermédiaire de la plaque de fer et va du site où le fer est oxydé vers celui où le dioxygène est réduit.

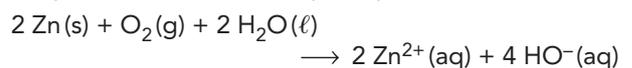
Cette expérience met en jeu une micropile dont le site où le fer est oxydé constitue l'anode (pôle -) et celui où le dioxygène est réduit constitue la cathode (pôle +). La plaque de fer constitue le circuit extérieur de la pile.

Cette corrosion qui ne se déroule pas uniformément sur la plaque de fer est dite différentielle.

4 a. Le schéma de l'expérience modélisant l'anode sacrificielle peut être le suivant :



L'équation de la réaction qui se produit est :



b. Les plaques de zinc fixées sur la coque des bateaux protègent l'acier contre la corrosion : elles sont oxydées et progressivement consommées, d'où la nécessité de les renouveler, alors que la coque, siège de la réduction du dioxygène, n'est pas corrodée. Le zinc se « sacrifie » pour protéger le fer (ou l'acier).

c. Si on remplaçait le zinc par le cuivre, le fer ne serait pas protégé et s'oxyderait, alors que la réduction du dioxygène se ferait sur la plaque de cuivre : un métal ne peut protéger qu'un métal plus noble que lui, c'est-à-dire moins facilement oxydable.

5 Le fer, l'acier et la fonte sont attirés par un aimant. Le logo du haut indique que l'acier est recyclable et qu'il sera vraisemblablement extrait d'un mélange de métaux par un électroaimant. Comme c'est indiqué dans le lexique, page 221 du manuel, le logo du bas, appelé Point vert, indique que le fabricant de ce matériau adhère à un système contribuant au recyclage des déchets issus des emballages.

6 Bilan En recyclant l'acier :

- on préserve les ressources naturelles que sont le minerai de fer et le charbon avec lequel est fabriqué le coke;
- on réduit l'utilisation d'énergie, celle nécessaire à

l'extraction du minerai et du charbon, mais aussi celle indispensable au fonctionnement du haut-fourneau;

- on diminue l'émission de gaz à effet de serre et plus particulièrement du dioxyde de carbone formé lors de la réduction des oxydes de fer par le carbone.

2 La vie des plastiques (p. 132-133)

1 On parle de macromolécules, car les molécules constituant les polymères ont des masses molaires élevées.

2 Le polyéthylène (PE), de formule $-(CH_2-CH_2)_n-$, est apolaire; les macromolécules constituant ce polymère à l'état solide sont les interactions de van der Waals mettant en jeu des dipôles instantanés.

Le polyéthylène téréphtalate (PET), de formule $-(O-CH_2-CH_2-O-CO-C_6H_4-CO)_n-$, est polaire; les macromolécules constituant ce polymère à l'état solide sont les interactions de van der Waals mettant en jeu des dipôles permanents. Les interactions sont plus fortes dans le PET que dans le PE justifiant que le PET se ramollit à une température supérieure à celle permettant le ramollissement du PE.

3 a. Le polyéthylène téréphtalate et les résines glycérophtaliques sont des polyesters, car ils résultent de la réaction entre un polyalcool ou polyol et un polyacide; leur formule présente le groupe $-CO-O-C$, caractéristique des esters.

b. Le polyéthylène téréphtalate résultant de la réaction d'un diacide et d'un dialcool ou diol présente des chaînes linéaires, il est donc thermoplastique. En revanche, les résines glycérophtaliques résultent de la réaction d'un diacide avec un trialcool ou triol, leurs chaînes peuvent être liées entre elles par l'intermédiaire de la troisième fonction alcool et sont alors réticulées. La structure tridimensionnelle qui en découle est figée, d'où le caractère thermoplastique de ces matériaux.

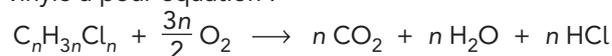
4 L'observation des graphes du document 2 montre :

- que le tonnage des emballages plastiques produits en France évolue peu depuis quinze ans, sa croissance n'étant que de 11 % entre 1994 et 2009 avec une décade depuis cinq ans;
- que le tonnage des emballages plastiques ménagers recyclés présente au contraire une très forte croissance passant d'une dizaine de milliers de tonnes, en 1993, à plus de deux cent mille tonnes en 2009; il faut voir là le résultat de la mise en place ces quinze dernières années du tri sélectif des déchets;
- une décroissance ou une stagnation, ces deux dernières années, des deux tonnages considérés; cela traduit peut être une prise en compte du gaspillage créé par des emballages souvent surdimensionnés par rapport au produit ou l'utilisation d'autres types d'emballages plus en phase avec un développement durable (verre, métaux recyclables, etc.).

5 À l'échelle macroscopique, le vieillissement d'un plastique se fait généralement de façon progressive. On peut ainsi observer l'apparition de fissures ou de

craquellements, la perte d'élasticité ou de thermo-plasticité, la décoloration du matériau. Abandonné aux intempéries, aux variations de température ou à la lumière, les matières plastiques deviennent cassantes et se délitent lentement voire très lentement; d'où la nécessité de ne pas abandonner ces matériaux dans la nature et de les recycler.

6 La combustion complète du polychlorure de vinyle a pour équation :

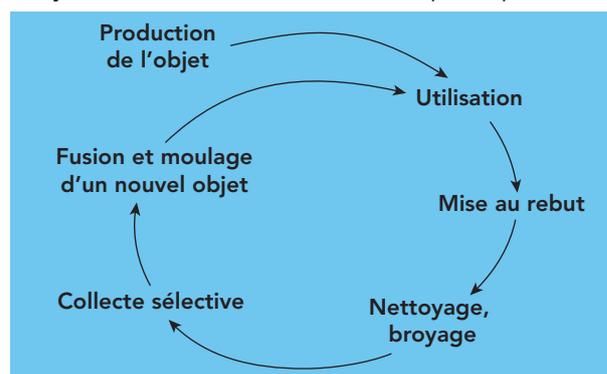


Cette combustion rejette dans l'atmosphère un gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone, et, s'il n'était pas piégé, un gaz source de pluies acides, le chlorure d'hydrogène, ce qui n'est pas bon d'un point de vue écologique.

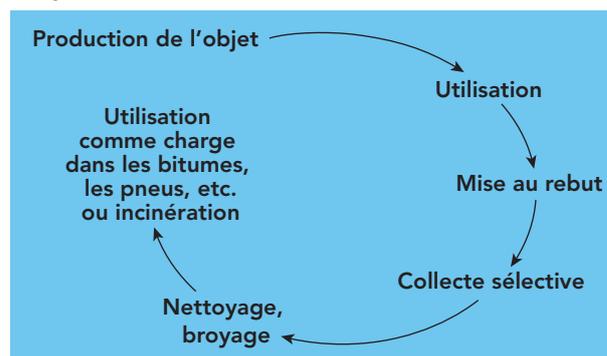
L'incinération n'est pas une méthode intéressante pour éliminer ce polymère, car son pouvoir calorifique inférieur est faible. Il est préférable de le recycler après passage en centre de tri.

7 Bilan La différence fondamentale entre un objet thermoplastique et un objet thermodurcissable est que le premier peut être fondu et moulé après un premier emploi alors que le second ne peut être fondu. Ils vont donc avoir des cycles de vie différents.

– Cycle de vie d'un matériau thermoplastique :



– Cycle de vie d'un matériau thermodurcissable :



3 Cycle de vie des matériaux (p. 134)

1 D'une part, l'aluminium est extrait de la bauxite, un minerai présent en énormes quantités sur notre planète. D'autre part, il est l'un des métaux les plus recyclés aujourd'hui, sa pénurie n'est donc pas à craindre.

2 La plupart des matières plastiques produites aujourd'hui sont des dérivés de la pétrochimie : leurs monomères proviennent, pour la plupart, soit de la distillation des pétroles, soit des opérations de reformage ou de vapocraquage des coupes issues de la distillation, soit des produits obtenus à partir de l'éthylène, du propène ou du benzène. Le recyclage des plastiques pour fabriquer de nouveaux objets limite le recours au pétrole.

3 Schéma récapitulatif illustrant la vie d'un objet manufacturé : voir le schéma ci-dessous.

4 Grâce au recyclage des matériaux :
– on limite l'extraction des matières premières, ce qui a pour conséquence de retarder l'épuisement

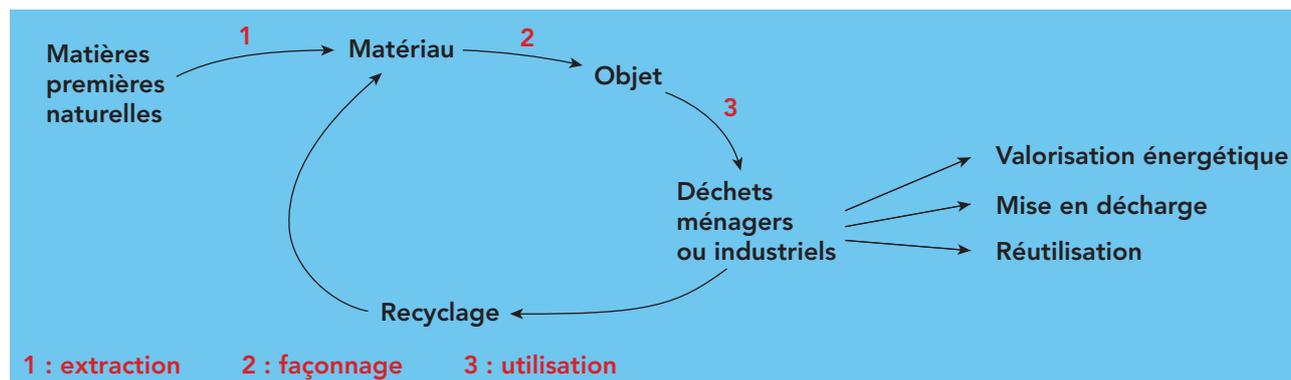
des ressources, de réduire les coûts, de diminuer la pollution autour des sites d'extraction, etc. ;

– on économise de l'énergie ; réutiliser une canette en aluminium coûte moins cher qu'électrolyser de l'alumine fondue pour la fabriquer ;

– on participe au développement durable en préservant la planète (moins de production de gaz à effet de serre, limitation des pollutions associées à certains procédés de fabrication, etc.).

5 Bilan Le « cycle de vie » d'un matériau représente l'ensemble des étapes qui jalonnent la vie de celui-ci depuis l'extraction du minerai qui va servir à le produire jusqu'à sa mise au rebut ou son recyclage. Lorsqu'il est recyclé, le cycle est fermé ; il est ouvert dans le cas de sa mise définitive en décharge.

L'homme joue un rôle essentiel dans la vie d'un matériau, en particulier dans le choix effectué en fin d'utilisation active : recyclage ou réutilisation ? Ce choix relève d'aspects économiques et écologiques liés au type de société considéré.



La vie d'un objet manufacturé.

Pratique expérimentale

1 Une étape de l'élaboration de l'aluminium : de la bauxite à l'alumine (p. 135)

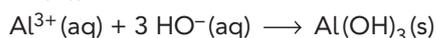
Matériel et produits

- Des tubes à essais dans leur portoir ;
- des agitateurs en verre ;
- des pipettes Pasteur ;
- un mortier et son pilon pour broyer la bauxite ;
- une capsule pour pesée ;
- deux béchers de 150 mL ;
- une éprouvette graduée de 25 mL ;
- un thermomètre -10 °C à 110 °C ;
- un dispositif de filtration avec Buchner ;
- deux verres de montre ;
- une solution de sulfate d'aluminium à $0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de soude à $2,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

- une solution d'acide chlorhydrique à $3 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de sulfate de fer (III) à $0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de thiocyanate de potassium à $0,01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de la bauxite naturelle si possible ou de la « bauxite reconstituée » obtenue en récupérant et séchant à l'étuve à 80 °C le solide obtenu en mélangeant dans 25 mL d'eau, 5 g de sulfate d'aluminium hydraté, $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$, 0,5 g de sulfate de fer hydraté, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, et quelques millilitres de soude à $2,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (le pH devant rester inférieur à 10) ;
- du papier pH.

A Tests préalables

1 Équation des réactions réalisées à partir de l'ion aluminium (III), Al^{3+} :



puis : $\text{HO}^{-}(\text{aq}) + \text{Al}(\text{OH})_3(\text{s}) \longrightarrow [\text{Al}(\text{OH})_4]^{-}(\text{aq})$

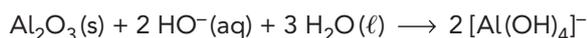
et enfin : $[\text{Al}(\text{OH})_4]^{-}(\text{aq}) + \text{H}_3\text{O}^{+}(\text{aq}) \longrightarrow \text{Al}(\text{OH})_3(\text{s}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\ell)$

et $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{s}) + 3 \text{H}_3\text{O}^{+}(\text{aq}) \longrightarrow \text{Al}^{3+}(\text{aq}) + 6 \text{H}_2\text{O}(\ell)$

2 Équation de la réaction de déshydratation :

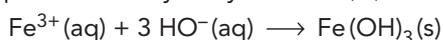


Équation de la réaction des ions hydroxyde en excès avec l'alumine :

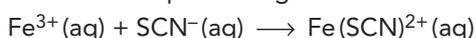


3 Équations des deux réactions réalisées à partir de l'ion fer (III), Fe^{3+} :

– précipitation de l'hydroxyde de fer (III) :



– formation du complexe rouge :



4 a. Le protocole doit présenter les étapes suivantes :

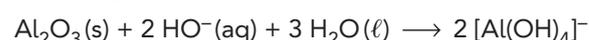
- attaque sous agitation du minerai broyé par la solution de soude concentrée ;

- filtration du mélange obtenu ;
- acidification du filtrat ;
- filtration, lavage, essorage et séchage à l'étuve du solide blanc obtenu.

b. Les élèves risquent d'avoir oublié de proposer d'exploiter deux facteurs cinétiques : le broyage du minerai et le chauffage du milieu réactionnel.

B Séparation des éléments aluminium et fer présents dans la bauxite

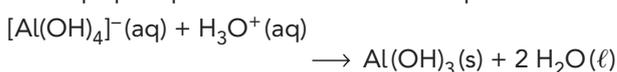
5 Seule l'alumine présente dans la bauxite réagit avec la soude selon :



Le précipité **a**, de couleur rouille, est de l'hydroxyde de fer (III), $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

6 En l'absence d'ions Fe^{3+} , la solution (0,5 mL) prélevée dans le tube à essais reste incolore lors de l'ajout de quelques gouttes de solution de thiocyanate de potassium.

7 Le solide qui se forme est de l'hydroxyde d'aluminium qui précipite selon la réaction d'équation :



2 Une étape de l'élaboration du cuivre : des ions cuivre (II) au métal cuivre (p. 136)

Matériel et produits

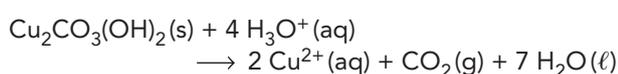
- Des tubes à essais dans leur portoir avec bouchons ;
- des pipettes Pasteur ;
- un erlenmeyer de 150 mL ;
- un verre de montre ou une capsule pour pesée ;
- du papier filtre ;
- un tampon Jex (laine de fer) ;
- une solution de sulfate de cuivre (II) à $0,10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de soude à $2,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

- une solution de sulfate de fer (III) à $0,050 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de soude à $2,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution S' utilisée pour l'étude à $0,03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en sulfate de fer (III) à $0,15 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en sulfate de zinc et à $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en acide sulfurique ;
- du fer blanc désétamé par traitement par une solution concentrée de chlorure de fer (III).

A Tests préalables

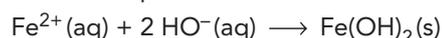
1 Un métal est natif lorsqu'il peut se trouver dans la nature sous forme de métal. La plupart des métaux sont dans la nature sous forme ionique ; c'est le cas des métaux réducteurs (Na, K, Fe, Al, Mg, etc.) facilement oxydables. L'or, l'argent et le cuivre sont des métaux natifs, on dit souvent que ce sont des métaux nobles.

2 L'équation de la réaction de lixiviation de la malachite s'écrit :



Cette réaction est une réaction acido-basique.

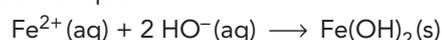
3 • Le précipité vert obtenu lors de l'ajout de la solution de soude est de l'hydroxyde de fer (II) formé par la réaction d'équation :



et traduisant la formation d'ions Fe^{2+} dans le tube T_1 selon la réaction d'équation :



• Le précipité vert obtenu lors de l'ajout de la solution de soude est de l'hydroxyde de fer (II) formé par la réaction d'équation :



et traduisant la formation d'ions Fe^{2+} dans le tube T_2 selon la réaction d'équation :



La formation d'ions Fe^{2+} , vert-pâle, explique la décoloration observée après agitation du fer dans la solution de fer (III).

4 a. Le protocole doit présenter les étapes suivantes :

- mise en contact de la solution S' avec des petites plaques de fer;
- agitation régulière du mélange;
- récupération du cuivre sur les plaques de fer.

b. Les élèves risquent de proposer d'utiliser de la laine de fer ce qui rendait difficile la récupération du cuivre en fin de réaction.

B Extraction du métal cuivre par cémentation

5 Tous les ions cuivre(II) ont été extraits si un ajout de solution de soude à un peu de solution traitée ne donne pas de précipité bleu de $\text{Cu}(\text{OH})_2$.

6 La masse maximale de cuivre que l'on pourrait extraire se déduit du volume et de la concentration en ions cuivre(II) de la solution étudiée :

$$m(\text{Cu})_{\text{max}} = n(\text{Cu}) \cdot M(\text{Cu}) = V(S') \cdot [\text{Cu}^{2+}] \cdot M(\text{Cu})$$

$$\text{soit : } m(\text{Cu})_{\text{max}} = 50 \times 10^{-3} \times 0,15 \times 63,5 = 0,48 \text{ g.}$$

Le rendement de l'extraction vaut :

$$\rho = n(\text{Cu})_{\text{obtenu}} / n(\text{Cu})_{\text{max}}$$

$$\text{soit ici : } \rho = m(\text{Cu})_{\text{obtenu}} / m(\text{Cu})_{\text{max}}$$

On a trouvé :

$$m(\text{Cu})_{\text{obtenu}} = 0,42 \text{ g, soit } \rho = 88 \text{ \%}.$$

Remarque : le fer participe à deux réactions : la réduction des ions cuivre(II), Cu^{2+} , et la réduction des ions fer(III), Fe^{3+} ; il n'est donc pas possible de déterminer la masse de cuivre extraite par pesée des morceaux de fer-blanc avant et après réaction.

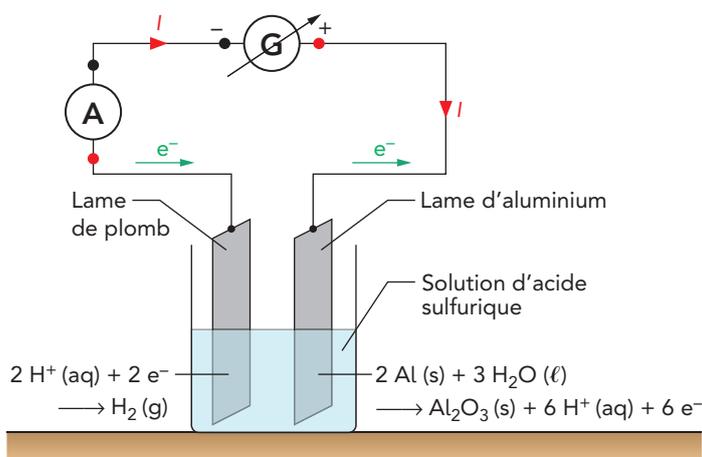
3 Protection de l'aluminium par anodisation (p. 137)

Matériel et produits

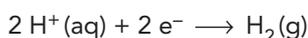
- Des gants et des lunettes de protection;
- cinq béchers de 150 mL;
- des chiffons;
- un multimètre en millivoltmètre;
- un multimètre en milliampèremètre;
- des fils de jonction (conformes aux normes de sécurité);
- un générateur de tension variable ou un générateur 12 V avec rhéostat pour montage potentiométrique;
- un chronomètre;
- une plaque chauffante;

- deux ou trois plaques d'aluminium entrant dans un bécher de 150 mL;
- une lame de plomb;
- un support d'électrodes permettant de plonger celles-ci dans un bécher;
- de l'acétone;
- une solution de soude à $5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution d'acide nitrique à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution d'acide sulfurique à $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution d'ammoniac à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution d'alizarine à $0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de bleu de méthylène à $0,05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

1 Le schéma du montage est le suivant :



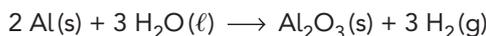
2 a. L'équation de la réaction électrochimique qui se produit à la cathode est :



b. À l'anode, de l'alumine se forme selon la réaction électrochimique d'équation :



c. L'équation globale de la réaction d'électrolyse se déduit des deux équations précédentes :



3 Il suffit de mesurer la résistance de la plaque d'aluminium avant et après électrolyse, à l'aide d'un ohmmètre, en s'intéressant à la résistance en épaisseur de la plaque. Il est facile de constater que la résistance, très faible avant électrolyse, devient très élevée après anodisation.

4 En écrivant que $n(\text{e}^-) = \frac{Q}{F} = I \cdot \frac{t}{F}$, mais aussi

$$n(\text{e}^-) = 6 \cdot n(\text{Al}_2\text{O}_3) = 6 \cdot \frac{m(\text{Al}_2\text{O}_3)}{M(\text{Al}_2\text{O}_3)}$$

il vient, avec $m(\text{Al}_2\text{O}_3) = S \cdot d \cdot \rho(\text{Al}_2\text{O}_3)$:

$$d = \frac{M(\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot I \cdot t}{6 \cdot S \cdot \rho(\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot F}$$

Avec $I = 0,20 \text{ A}$, $t = 1200 \text{ s}$ et $S = 2 \times 25 \text{ cm}^2$, on trouve $d = 2,6 \text{ } \mu\text{m}$.

4 Protection du fer par électrozingage (p. 138)

Avant d'aborder les techniques de dépôt de zinc par électrolyse, il nous a paru souhaitable de mettre en évidence le phénomène de corrosion différentielle. Cette corrosion, dans laquelle l'oxydation et la réduction s'effectuent en deux lieux différents, met en jeu

des micropiles; la corrosion différentielle se manifeste en présence d'eau et de dioxygène lorsque le milieu (électrolyte, matériau métallique) est hétérogène.

Matériel et produits

- Des tubes à essai dans leur support;
- une pipette Pasteur;
- une boîte de Pétri;
- un bécher pouvant accueillir les électrodes sur leur support;
- un multimètre en millivoltmètre;
- un multimètre en milliampèremètre;
- des fils de jonction (conformes aux normes de sécurité);
- un générateur de tension variable ou générateur 12 V avec rhéostat pour montage potentiométrique;
- un chronomètre;
- une solution de soude à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution de phénolphtaléine à 1 % dans l'éthanol en flacon compte-gouttes;

- une solution de sulfate de fer (II) à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution d'hexacyanoferrate (III) de potassium à $0,03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution tiède corrosive constituée de 100 mL de chlorure de sodium à $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, de 3 g d'agar-agar, de 5 mL de solution d'hexacyanoferrate (III) de potassium à $0,03 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- deux clous qui auront été martelés, puis fraîchement décapés par action d'une solution d'acide sulfurique à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, l'un d'eux ayant à son extrémité du zinc déposé par galvanisation (le clou aura été plongé dans du zinc fondu);
- une solution d'électrolyte avec, pour 100 mL, 16,5 g de sulfate de zinc, 10 g de chlorure de potassium et 3 g d'acide borique;
- du papier pH.

A Mise en évidence du phénomène de corrosion, rôle du zinc dans la protection

- L'équation de formation du précipité s'écrit :

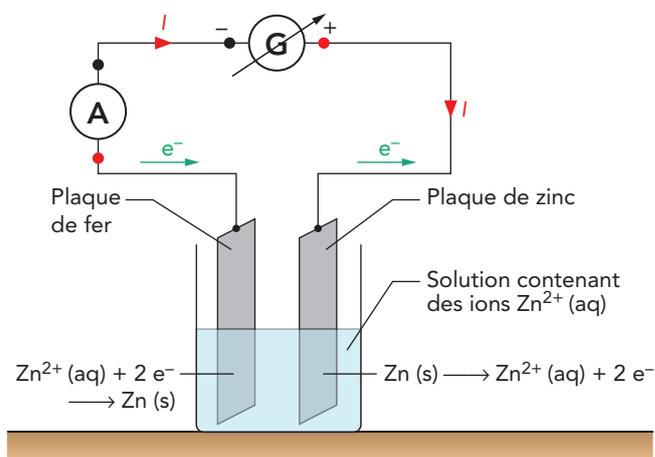
$$3 \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2 [\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}(\text{aq}) \longrightarrow \text{Fe}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]_2(\text{s})$$
- La coloration bleue sur le clou C_1 traduit la formation d'ion Fe^{2+} résultant de l'oxydation du fer selon l'équation :

$$\text{Fe}(\text{s}) \longrightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$$
- L'autre réaction électrochimique qui se produit est la réduction du dioxygène, O_2 , avec formation d'ions hydroxyde, HO^- , comme le traduit la coloration rose prise par la phénolphtaléine selon la réaction d'équation :

$$\text{O}_2(\text{g}) + 2 \text{H}_2\text{O}(\ell) + 4 \text{e}^- \longrightarrow 4 \text{HO}^-(\text{aq})$$
- Le clou C_2 ne présente pas de zone colorée en bleu, il n'y a pas oxydation du fer constituant ce clou. La coloration rose de la phénolphtaléine traduisant la réduction du dioxygène, cela signifie qu'une oxydation s'effectue sur le clou : c'est le zinc qui s'oxyde comme en témoigne un précipité blanc d'hexacyanoferrate(II) de zinc, $\text{Zn}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6](\text{s})$, l'ion $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}(\text{aq})$ étant, vu les conditions opératoires, réduit en ion $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}(\text{aq})$.

B Electrozingage

5 Le schéma du montage est le suivant :



6 Équation des réactions électrochimiques :

- à la cathode : $\text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{Zn}(\text{s})$
- à l'anode : $\text{Zn}(\text{s}) \longrightarrow \text{Zn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{e}^-$

Il s'agit d'une électrolyse à « anode soluble ».

On constate qu'à la cathode s'effectue également un léger dégagement de dihydrogène dû à la réaction électrochimique d'équation $2 \text{H}^+(\text{aq}) + 2 \text{e}^- = \text{H}_2(\text{g})$.

7 En écrivant que $n(\text{e}^-) = \frac{Q}{F} = \frac{I \cdot t}{F}$, mais aussi

$$n(\text{e}^-) = 2 \cdot n(\text{Zn}) = \frac{2 \cdot m(\text{Zn})}{M(\text{Zn})}$$

il vient :
$$m(\text{Zn}) = \frac{I \cdot t \cdot M(\text{Zn})}{2 \cdot F}$$

Avec $I = 0,40 \text{ A}$ et $t = 1200 \text{ s}$, on trouve une augmentation de masse de la cathode $m(\text{Zn}) = 162 \text{ mg}$.

On obtient en réalité une masse moindre en raison de la réaction concurrente de formation de dihydrogène.

La variation de masse de l'anode est très voisine de 162 mg .

Si l'on souhaite une variation de masse plus importante, on pourra augmenter la durée d'électrolyse.

8 L'épaisseur d du dépôt se déduit de la masse calculée précédemment :

$$d = \frac{M(\text{Zn}) \cdot I \cdot t}{2 \cdot S \cdot \rho(\text{Zn}) \cdot F}$$

Avec $I = 0,40 \text{ A}$, $t = 1200 \text{ s}$, $S = 2 \times 25 \text{ cm}^2$ et $\rho(\text{Zn}) = 7,1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, on trouve une épaisseur $d = 4,6 \text{ mm}$.

9 L'intérêt d'utiliser une anode en zinc est de maintenir sensiblement constante la concentration en ion zinc (II), Zn^{2+} , et d'assurer ainsi un dépôt régulier de métal zinc sans risque de pénurie de réactif cathodique.

5 Recyclage d'un polymère : le polyméthacrylate de méthyle (p. 139)

Matériel et produits

- Des tubes à essais munis de bouchons dans leur portoir;
- un gros tube à essais muni d'un tube à dégagement coudé;
- un bécher ou récipient pour bain-marie glacé;
- un gros tube à essais avec un réfrigérant à air;
- un support, une noix et une pince;
- un bain-marie bouillant;
- une solution aqueuse diluée de dibrome dans un flacon compte-gouttes (disponible tout préparé chez les fournisseurs habituels de nos laboratoires);
- du cyclohexane;

- du cyclohexène;
- du 2-méthylbut-2-ène;
- de la glace;
- des petits morceaux de polyméthacrylate de méthyle (plexiglas) incolore et suffisamment petits pour rentrer dans le gros tube à essais;
- du peroxyde de benzoyle (disponible en grandes surfaces de bricolage, car utilisé pour certaines polymérisations « domestiques », mais aussi présent dans le catalogue de certains fournisseurs habituels de nos laboratoires).

A Dépolymérisation du PMMA

1 Les formules topologiques des trois espèces organiques utilisées sont :



Cyclohexane



Cyclohexène



2-méthylbut-2-ène

2 Les réactions observées avec le cyclohexène et le 2-méthylbut-2-ène sont dues à la double liaison carbone C=C. La réaction est une addition qui n'est pas possible avec le cyclohexane qui ne possède pas de liaison C=C.

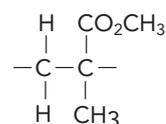
Remarques : on peut constater au bout d'un certain temps, et surtout en présence d'une lumière intense, la décoloration de la solution contenant le cyclohexane; il se produit alors une substitution (radi-

caire) d'un atome d'hydrogène par un atome de brome.

3 On peut vérifier expérimentalement que le liquide recueilli est le monomère, le méthacrylate de méthyle, en rajoutant quelques gouttes du distillat à une solution aqueuse de dibrome : la décoloration est immédiate.

B Repolymérisation du PMMA

4 Le motif du polyméthacrylate de méthyle se déduit de la formule ci-contre du monomère.



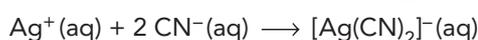
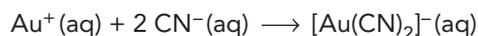
5 Un matériau plastique peut être recyclé comme le PMMA s'il n'est pas thermodurcissable, car il n'est alors pas dépolymérisable par chauffage.

Résolution de problèmes scientifiques

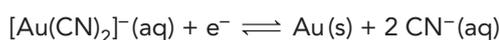
2 Du minerai au métal : le cas de l'or et de l'argent (p. 142)

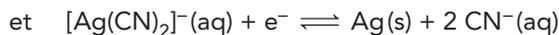
Pour résoudre le problème posé, il faut analyser les diverses étapes du protocole. Dans l'ordre, il faut réaliser :

- l'oxydation de l'or et de l'argent par le dioxygène en présence d'ions cyanure qui complexent les ions Au^+ et Ag^+ selon les réactions d'équations :

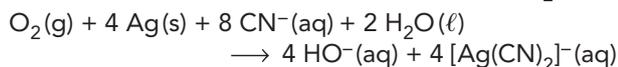
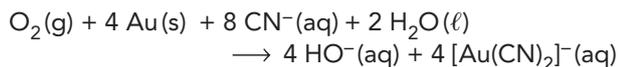


Ces oxydations mettent en jeu les demi-équations redox suivantes en milieu basique :

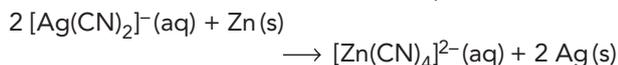
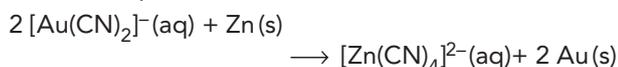




dont le bilan donne :



• la réduction des ions complexes par le métal zinc selon les équations :



• la filtration du mélange et le rinçage abondant des métaux (l'or et l'argent produits et l'excès de zinc)

dans le filtre. Ceci a pour but d'éliminer toute trace d'ions cyanure avant acidification pour éviter la formation d'acide cyanhydrique HCN un gaz toxique ;

• l'élimination du métal zinc par action de l'acide sulfurique selon la réaction d'équation :



• la filtration du mélange pour récupérer l'or et l'argent.

La masse minimale de zinc se déduit des réactions de réductions des ions complexes :

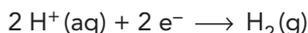
$$\begin{aligned} m(\text{Zn}) &= \frac{1}{2} (n(\text{Ag}) + n(\text{Au})) \cdot M(\text{Zn}) \\ &= \frac{1}{2} \frac{m(\text{Ag})}{M(\text{Ag})} + \frac{m(\text{Au})}{M(\text{Au})} \cdot M(\text{Zn}) \\ &= 17 \text{ g.} \end{aligned}$$

3 Protection de l'aluminium par anodisation (p. 143)

Le schéma de cette électrolyse est le même que celui de la Pratique expérimentale 3, p. 137 du manuel.

Pour répondre à la question posée il faut disposer de l'équation globale de l'électrolyse. Celle-ci se déduit des réactions qui se déroulent aux électrodes.

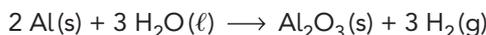
L'équation de la réaction électrochimique qui se produit à la cathode est :



À l'anode, de l'alumine se forme selon la réaction électrochimique d'équation :



d'où l'équation globale de la réaction :



Pour trouver la durée Δt de la réaction, il suffit d'exploiter les relations : $Q = I \cdot \Delta t = n(\text{e}^{-}) \cdot F$

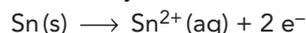
et $n(\text{e}^{-}) = 6 \cdot n(\text{Al}_2\text{O}_3) = \frac{6 \cdot m(\text{Al}_2\text{O}_3)}{M(\text{Al}_2\text{O}_3)}$

Il vient, avec $m(\text{Al}_2\text{O}_3) = S \cdot d \cdot \rho(\text{Al}_2\text{O}_3)$:

$\Delta t = n(\text{e}^{-}) \cdot \frac{F}{I} = \frac{6 \cdot S \cdot d \cdot \rho(\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot F}{M(\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot I} = 3,0 \text{ h}$

4 Protection du fer par étamage (p. 143)

À l'anode, l'étain est oxydé :



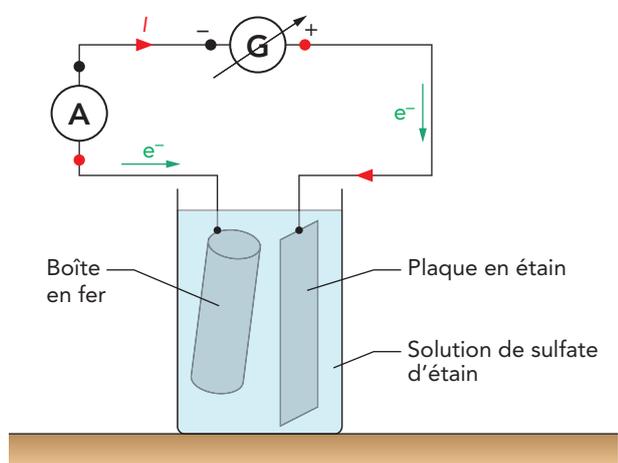
À la cathode, les ions étain(II) sont réduits :



et le métal formé se dépose sur la boîte assurant son étamage.

Dans les conditions de l'énoncé, la concentration en ion étain(II) reste constante dans la solution.

Le schéma de l'expérience est le suivant :



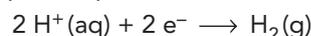
Pour déterminer la durée minimale t_{\min} de la réaction, il suffit d'exploiter les deux relations suivantes :

$Q = I \cdot t_{\min} = n(\text{e}^{-}) \cdot F$ et $n(\text{e}^{-}) = 2 \cdot n(\text{Sn}) = \frac{2 \cdot m(\text{Sn})}{M(\text{Sn})}$

Avec : $m(\text{Sn}) = S \cdot d \cdot \rho(\text{Sn})$

il vient : $t_{\min} = n(\text{e}^{-}) \cdot \frac{F}{I} = \frac{2 \cdot S \cdot d \cdot \rho(\text{Sn}) \cdot F}{M(\text{Sn}) \cdot I} = 148 \text{ s.}$

La durée réelle est supérieure à t_{\min} , car, à la cathode, il se forme aussi du dihydrogène selon la réaction électrochimique d'équation :

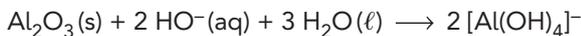


5 Du minerai de bauxite à l'alumine (p. 144)

Ce problème n'est réellement une découverte pour les élèves que s'ils n'ont pas fait la manipulation de la page 135 du manuel. S'ils l'ont fait, ce problème peut être donné en contrôle.

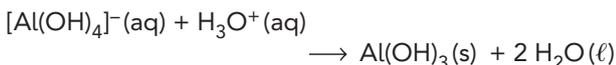
Le protocole proposé doit présenter les étapes suivantes :

- attaque sous agitation du minerai broyé par la solution de soude concentrée, seule l'alumine réagit selon l'équation :



- filtration du mélange obtenu ; le filtrat contient alors $[\text{Al}(\text{OH})_4]^- + \text{Na}^+$;

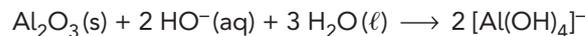
- acidification du filtrat ; il se produit alors la réaction d'équation :



- filtration, lavage, essorage du solide blanc obtenu, puis chauffage à haute température pour déshydrater l'hydroxyde d'aluminium en alumine selon la réaction d'équation :



Comme seule l'alumine réagit avec l'hydroxyde de sodium selon la réaction d'équation :



il vient : $n(\text{NaOH}) = 2 n(\text{Al}_2\text{O}_3)$

$$\text{d'où : } m(\text{NaOH}) = 2 \frac{m(\text{Al}_2\text{O}_3)}{M(\text{Al}_2\text{O}_3)} \cdot M(\text{NaOH})$$

$$\text{soit : } m(\text{NaOH}) = 2 \times 0,583 \times 1,00 \times 10^3 \times \frac{40,0}{102}$$
$$m(\text{NaOH}) = 457 \text{ kg.}$$

6 Fonctionnement d'un haut-fourneau (p. 144)

Pour répondre à ce problème, il suffit d'écrire les équations et d'en faire le bilan complet.

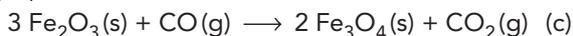
Combustion complète du carbone :



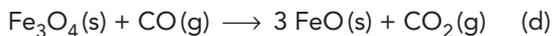
Réaction du dioxyde de carbone et du carbone :



Réduction de l'hématite, $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{s})$, en magnétite, $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s})$:



Réduction de la magnétite, $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s})$, en wüstite, $\text{FeO}(\text{s})$:



Réduction de la wüstite, $\text{FeO}(\text{s})$, en fer, $\text{Fe}(\text{s})$:



Globalement, l'ensemble des réactions mises en jeu dans le haut-fourneau utilise comme seuls réactifs C et Fe_2O_3 , et admet comme seuls produits CO_2 et Fe. Aussi, la suite de ces cinq réactions se résume-t-elle à :



Il vient alors : $n(\text{C}) = \frac{3}{2} n(\text{Fe}_2\text{O}_3)$

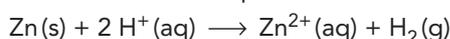
$$\text{d'où : } m(\text{C}) = \frac{3}{2} \frac{m(\text{Fe}_2\text{O}_3)}{M(\text{Fe}_2\text{O}_3)} \cdot M(\text{C})$$

$$\text{soit : } m(\text{C}) = \frac{3}{2} \times 0,64 \times 1,0 \times 10^3 \times \frac{12}{159,6}$$
$$= 72 \text{ kg.}$$

7 Recyclage des laitons (p. 145)

Au vu des données fournies, la méthode physique peut faire appel à une détermination de masse volumique. Il suffit pour cela de déterminer la masse et le volume d'un échantillon du laiton considéré. Une pesée avec une balance de précision donne la masse. Le volume peut être déterminé en immergeant l'échantillon dans une éprouvette graduée et en repérant la variation de volume. Une fois la masse volumique connue, il suffit d'exploiter le graphe $\rho = f(\% \text{Zn})$.

La méthode chimique consiste à réduire en copeaux ou mieux en poudre un petit échantillon du laiton considéré, à peser les copeaux ou la poudre (masse m) et à la faire réagir sous agitation avec une solution d'acide chlorhydrique à $1,00 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Seul le zinc réagit selon la réaction d'équation :



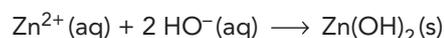
Lorsque plus aucun dégagement gazeux n'est détectable, filtrer le mélange, l'introduire dans une fiole jaugée de 100,0 mL, compléter jusqu'au trait avec de l'eau distillée et homogénéiser.

Doser alors un volume $V = 10,0 \text{ mL}$ de la solution de la fiole jaugée avec une solution d'hydroxyde de sodium à $0,100 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ en faisant un suivi pH-métrique ou conductimétrique.

Lors du dosage pH-métrique, on observera deux sauts de pH, l'un pour V_1 correspondant à la fin du dosage des ions $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ et l'autre pour V_2 correspondant à la fin du dosage des ions $\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$.

Lors du dosage conductimétrique, on observera un premier changement de pente pour V_1 correspondant à la fin du dosage des ions $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq})$ et un second pour V_2 correspondant à la fin du dosage des ions $\text{Zn}^{2+}(\text{aq})$.

La quantité d'ions zinc dosés par la réaction d'équation :



$$\text{est : } n(\text{Zn}^{2+}) = 0,100 \times \frac{V_2 - V_1}{2}$$

La masse de zinc dans l'échantillon s'en déduit :

$$m(\text{Zn}) = 10 \times 0,100 \times \frac{(V_2 - V_1)}{2} \times M(\text{Zn})$$

ainsi que le pourcentage en masse de zinc :

$$\% \text{ Zn} = \frac{m(\text{Zn})}{m}$$

8 Or jaune, or blanc, or rouge (p. 146)

- Un bijou en or pur est à 24 carats.

Pour déterminer sa masse volumique, il suffit de considérer la structure cubique à faces centrées représentée. Elle contient l'équivalent de quatre atomes ($8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2}$), donc sa masse m vaut :

$$m = 4 \cdot \frac{M(\text{Au})}{N_A} = 1,31 \times 10^{-24} \text{ kg.}$$

Les atomes d'or étant tangents sur la diagonale de la face, leur rayon $R(\text{Au})$ est tel que :

$$4 R(\text{Au}) = a \sqrt{2}$$

soit : $a = \frac{4 R(\text{Au})}{\sqrt{2}} = 407 \text{ pm}$ et $V = 6,76 \times 10^{-29} \text{ m}^3$;

d'où : $\rho = \frac{m}{V} = 19,4 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

- Un bijou en or blanc de 24 g contient 12 g d'argent et 12 g d'or; il est donc à 12 carats.

Ce bijou a la même structure que celui en or pur, une structure cubique à faces centrées, mais cette structure contient globalement deux atomes d'or et deux atomes d'argent; sa masse est :

$$m' = 2 \times \frac{M(\text{Au}) + M(\text{Ag})}{N_A} = 1,01 \times 10^{-24} \text{ kg.}$$

Les atomes d'or et d'argent ayant des rayons égaux, le volume du cube d'or pur ou d'or blanc est le même, d'où :

$$\rho = \frac{m'}{V} = 15,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}.$$

- Un objet constitué uniquement d'or et d'argent a une structure cubique à faces centrées. Si x_{Au} est la fraction molaire en or de cet objet, chaque cube contient $4 x_{\text{Au}}$ atomes d'or et $4(1 - x_{\text{Au}})$ atomes d'argent; sa masse m est alors :

$$m = \frac{4 x_{\text{Au}} \cdot M(\text{Au}) + 4 (1 - x_{\text{Au}}) \cdot M(\text{Ag})}{N_A}$$

La masse volumique de cet objet vaut alors :

$$\rho = \frac{4 x_{\text{Au}} \cdot M(\text{Au}) + 4 (1 - x_{\text{Au}}) \cdot M(\text{Ag})}{N_A \cdot V}$$

Connaissant ρ , il est possible de déterminer x_{Au} , seule inconnue de la formule ci-dessus.

La relation donnée dans le document 3 permet de calculer y_{Au} et de déterminer la masse $m(\text{Au})$ d'or dans 24 g de cet objet et d'en déduire sa pureté P , en carats :

$$P = 24 y_{\text{Au}}$$

Exemple : si $\rho = 12,0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, on trouve $x_{\text{Au}} = 0,157$, puis $y_{\text{Au}} = 0,254$; soit :

$$P = 6 \text{ carats.}$$

Remarque : un objet en or blanc ne peut avoir une masse volumique inférieure à $10,6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, valeur de la masse volumique de l'argent pur!!

Bibliographie et sitographie

Bibliographie

- R. PERRIN et J.-P. SCHARFF, *Chimie Industrielle*, Masson, 1993.
- J.-L. VIGNES, *Données sur les principaux produits chimiques, Métaux et matériaux*, Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie, ENS Cachan, 1997.
- M. VERDAGUER, J. SARRAZIN, *L'oxydoréduction*, Ellipses, 1991.
- C. ROCHAIX, *Électrochimie*, Nathan, 1996.
- J.-L. VIGNES et coll., *Une vie de fer-blanc*, BUP n° 763, avril 1994.
- J.-L. VIGNES et coll., *Une vie de zinc (1)*, BUP n° 766, juillet-août-septembre 1994.
- J.-L. VIGNES et coll., *Une vie de zinc (2)*, BUP n° 770, janvier 1995.
- J.-L. VIGNES et coll., *Une vie de cuivre*, BUP n° 790-791, janvier-février 1997.
- J.-L. VIGNES et coll., *Une vie d'aluminium*, BUP n° 790-791, janvier-février 1997.

Sitographie

En plus des sites mentionnés dans le manuel : <http://www.aia.aluminium.qc.ca>

Les matériaux supraconducteurs sont principalement utilisés dans les appareils médicaux (RMN et IRM) et dans les trains à lévitation magnétique.

2 Cellules photovoltaïques (p. 150)

1 a. La cathode **2** est une grille et non une plaque, car elle doit laisser entrer la lumière provenant du Soleil au sein de la cellule photovoltaïque.

b. Les couches **3** et **4** sont constituées de semi-conducteurs dopés afin qu'un champ électrique interne puisse être créé lorsque les deux couches sont mises en contact.

2 Pour qu'un photon puisse arracher un électron à un atome de silicium il faut que : $h \cdot \nu > \mathcal{E}_g$.

3 Le champ électrique interne dans la cellule photovoltaïque permet aux électrons libérés d'être entraînés vers la cathode, générant ainsi un courant électrique qui peut alimenter un circuit extérieur.

4 L'intensité du courant électrique débité par une cellule photovoltaïque peut dépendre de l'ensoleille-

ment et de l'orientation de la cellule par rapport à la direction des rayons lumineux reçus.

5 Puissance électrique fournie par la cellule :

$$\mathcal{P}_E = U \cdot I = 0,56 \times 200 = 112 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}.$$

6 Le rendement de la cellule est :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_E}{\mathcal{P}_S} = \frac{112}{1000} = 0,112, \text{ soit } 11,2\%.$$

Le rendement de la cellule photovoltaïque est bien de l'ordre de 15%.

7 Bilan Les rendements actuels des cellules photovoltaïques au silicium sont peu élevés. Des recherches sont actuellement menées pour améliorer les rendements.

3 Tensioactifs, émulsions, mousses (p. 151)

1 D'une part, l'eau est un solvant polaire et, d'autre part, elle peut participer à des liaisons hydrogène, aussi les interactions susceptibles de s'établir entre la tête du tensioactif et l'eau sont les suivantes :

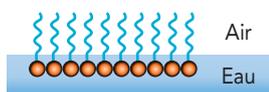
– pour les tensioactifs anioniques tels que les alkyl-sulfate de sodium, $R-SO_3^- + Na^+$, ce sont des interactions ion-dipôle; les liaisons s'effectuent entre les anions et les atomes d'hydrogène de l'eau portant une charge partielle δ^+ ;

– pour les tensioactifs cationiques tels que les chlorures d'alkylammonium quaternaire, $R-NH_3^+ + Cl^-$, ce sont des interactions ion-dipôle; les liaisons s'effectuent entre les cations et les atomes d'oxygène de l'eau portant une charge partielle $2\delta^-$;

– pour les tensioactifs non ioniques tels que les éther-alcools, $R-O-CH_2-CH_2-OH$, les interactions dues à des liaisons hydrogène de type $O-H \cdots |O$ entre les molécules d'eau et le groupe hydroxyle, $-OH$, ou entre les molécules d'eau et l'atome d'oxygène du groupe éther, $C-O-C$.

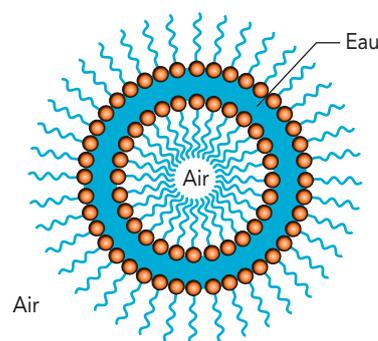
Les interactions susceptibles de s'établir entre la queue du tensioactif et l'octane sont des interactions de van der Waals.

2 a. À la surface d'une eau savonneuse recouverte par un film de tensioactifs, la tête des espèces tensioactives polaires ou ioniques interagit avec l'eau, alors que la queue apolaire se retrouve dans l'air.



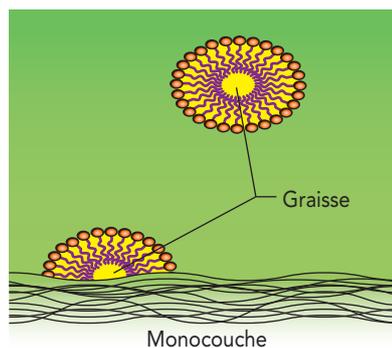
Film de tensioactifs à la surface de l'eau.

b. Dans une bulle de savon due à une eau savonneuse, il y a une double couche de tensioactifs. Les têtes des espèces tensioactives interagissent avec l'eau constituant le film, alors que les queues se retrouvent dans l'air extérieur ou intérieur à la bulle.



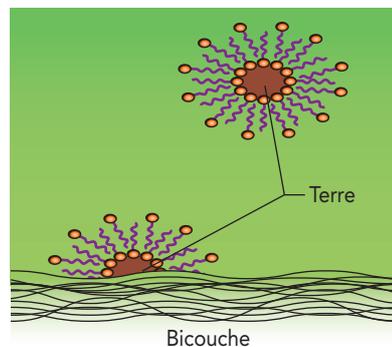
Bulle de savon.

3 Bilan L'élimination d'une tache de graisse (espèce organique) résulte de la formation d'une micelle formée d'une monocouche de tensioactifs, car l'interaction entre la graisse et le tensioactif se fait par la queue de tensioactif, sa tête interagissant alors avec l'eau.



Élimination d'une tache de graisse.

L'élimination d'une tache de terre (espèce ionique) nécessite la formation d'une micelle formée d'une bicouche de tensioactifs, car l'interaction entre la terre et le tensioactif se fait par la tête du tensioactif. La mise en suspension dans l'eau de ces micelles nécessite alors une interaction de l'eau avec les têtes des espèces tensioactives, d'où la nécessité d'une double couche.



Élimination d'une tache de terre.

4 Les cristaux liquides (p. 152)

1 En chauffant le benzoate de cholestéryl, F. REINITZER a d'abord observé le passage de l'état solide à l'état de cristal liquide (liquide opaque) en phase nématique, smectique ou cholestérique, à la température de 149 °C, puis le cristal liquide est passé à l'état liquide (transparent) à la température de 179 °C.

2 Les cristaux liquides étant des molécules polaires, elles peuvent s'arranger parallèlement les unes aux autres comme le font les espèces tensioactives présentes dans les eaux savonneuses (voir schéma de la question 2a de l'activité 3).

Cet arrangement ordonné est favorisé par l'action d'un champ électrique créé par deux plans parallèles chargés l'un positivement, l'autre négativement.

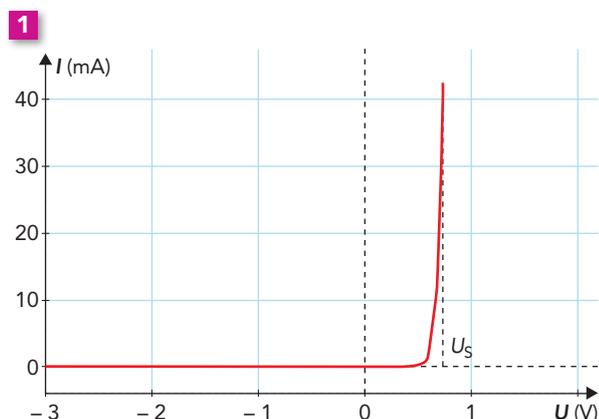
3 Les cristaux cholestériques sont caractérisés par une structure en hélice dont le pas dépend de la température; lorsque la température varie, la valeur du pas change et l'action de la lumière est modifiée, ce qui se traduit par un changement de couleur expliquant le fonctionnement des thermomètres à contact.

4 Bilan Dans les écrans plats et dans les vitrages à opacité variable (voir à ce propos l'activité 7, p. 173 du manuel), c'est le caractère polaire des cristaux liquides nématiques qui est à l'origine des propriétés observées. En revanche, dans les thermomètres à contact ou dans les inscriptions sur les billets, c'est la présence d'un pas « d'enroulement » des plans des cristaux cholestériques qui est à l'origine des effets optiques observés.

Pratique expérimentale

1 Caractéristique d'une diode (p. 153)

A Caractéristique d'une diode au silicium



Le graphe $I = f(U_D)$ présente deux parties principales :

a. pour $U_D < 0,5$ V environ, $I = 0$ mA; la diode ne conduit pas le courant électrique (diode bloquée);

b. pour $U_D > 0,5$ V environ, l'intensité I est non nulle; la diode conduit le courant électrique (diode passante).

2 Lorsque la diode devient passante, la tension de seuil U_S aux bornes de la diode est de l'ordre 0,7 V.

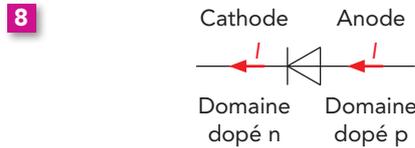
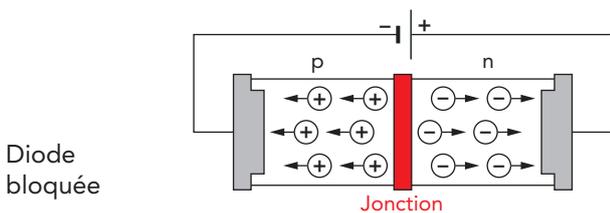
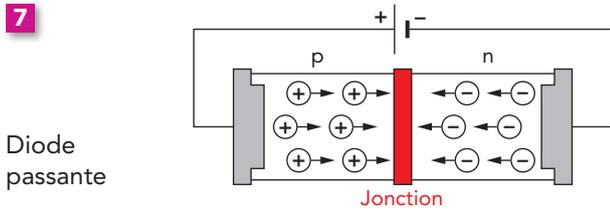
3 Lorsqu'on inverse le sens de branchement d'une diode passante, celle-ci devient bloquée. Plus aucun courant ne circule.

4 La diode n'est donc pas un dipôle symétrique, contrairement à un conducteur ohmique, par exemple.

B Fonctionnement interne d'une diode

5 À l'extérieur d'un générateur, le courant circule conventionnellement de la borne positive vers la borne négative du générateur. Les électrons circulent dans le sens opposé.

6 Les électrons, chargés négativement, se déplacent vers la borne positive du générateur et les trous, chargés positivement, se déplacent vers la borne négative du générateur.



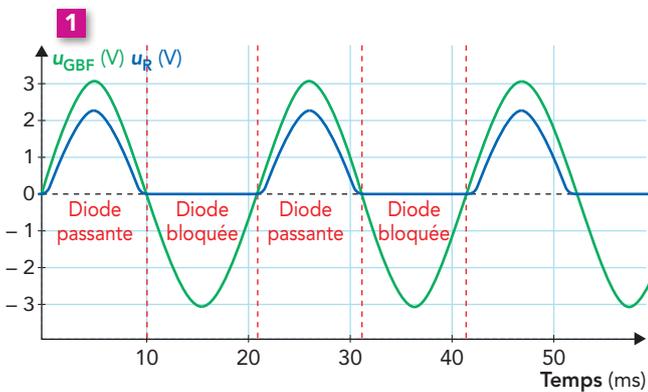
9 En chimie :
 – à l'anode a lieu une oxydation, donc une libération d'électrons ;
 – à la cathode a lieu une réduction, donc une consommation d'électrons.

Au niveau de la diode, les électrons :

– quittent le domaine dopé p, donc l'anode, par analogie avec l'oxydoréduction en chimie ;
 – arrivent sur le domaine dopé n, donc la cathode, par analogie avec l'oxydoréduction en chimie.

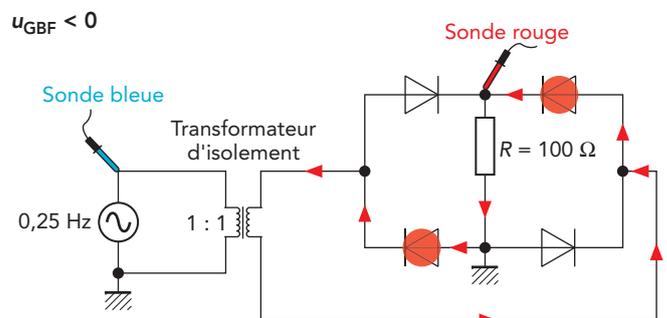
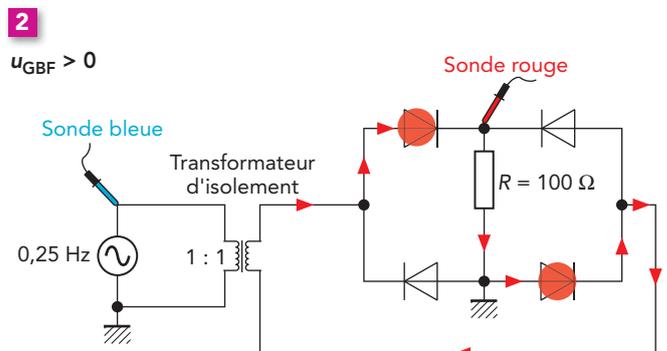
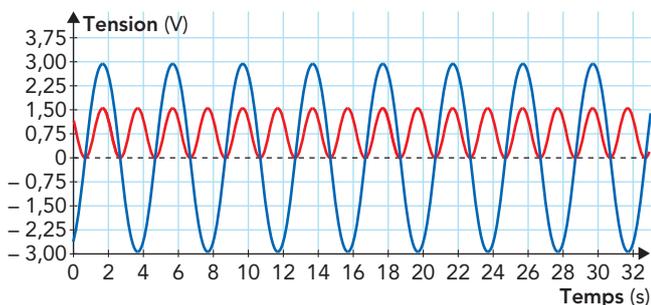
2 Du semi-conducteur à la tension continue (p. 154)

A Redressement mono-alternance avec une diode



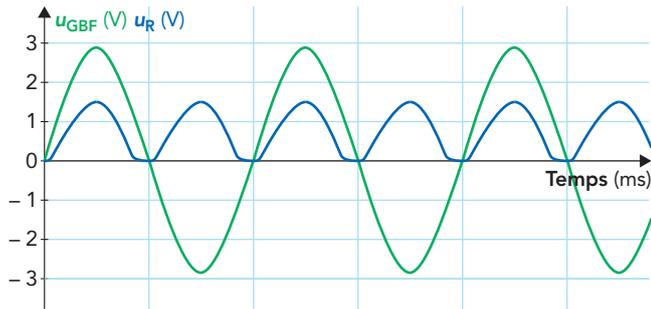
B Redressement bi-alternance avec un pont de diodes

Visualisation des tensions mesurées par les sondes rouges et bleues sur le logiciel de simulation :



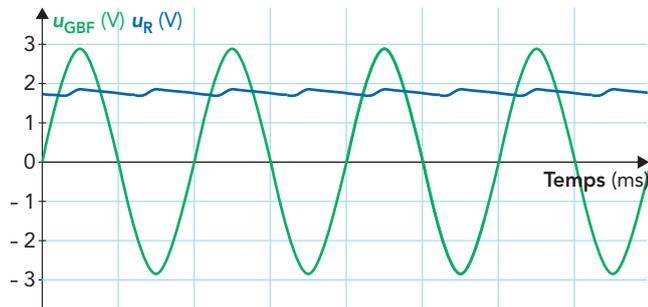
3 Au cours d'une période du générateur, le courant traverse deux fois la résistance, dans le même sens.

Acquisition :



L'acquisition est bien conforme à la simulation précédente.

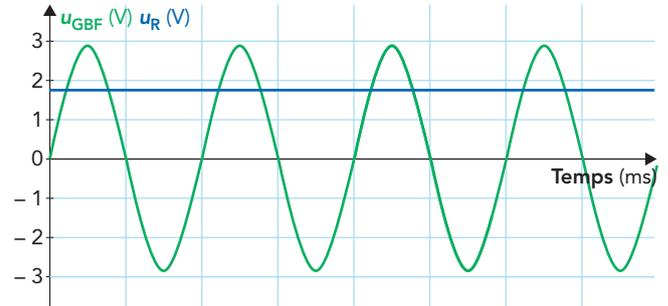
4 Acquisition avec un condensateur en parallèle avec la résistance :



Le rôle du condensateur est de « lisser » la tension redressée.

5 Le lissage est d'autant plus efficace que $\tau = R \cdot C$ est grand devant $T = \frac{1}{f}$.

Comme f et R sont des constantes, il faut choisir la plus grande valeur pour la capacité du condensateur, soit $C = 10 \mu\text{F}$.



6 La tension constante (continue) pour le lissage précédent est 1,8 V.

3 Étude d'une cellule photovoltaïque (p. 155)

A Caractéristiques et rendement d'une cellule photovoltaïque

1 Tracé de la caractéristique $I = f(U)$ pour $E = 520 \text{ lux}$ (voir le schéma ci-dessous).

Tableau de mesures à compléter (pour les élèves) :

$I \text{ (mA)}$	0,58	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,53	0,52	0,33	0,23	0,17	0,00
$U \text{ (V)}$	0,00	1,13	2,26	2,78	3,86	4,35	4,79	5,27	6,58	6,79	6,87	7,05
$\mathcal{P} \text{ (mW)}$												

Pour $U < 5 \text{ V}$ environ, l'intensité I reste quasi-constante autour de 0,55 mA.

Pour $U > 6 \text{ V}$, l'intensité chute rapidement jusqu'à s'annuler pour $U = 7,05 \text{ V}$.

2 La caractéristique de la cellule photovoltaïque ne passe pas par l'origine : la cellule photovoltaïque est un générateur et non un récepteur.

3 Graphiquement, on obtient :

$$I_{cc} = 0,58 \text{ mA} \quad \text{et} \quad U_{co} = 7,05 \text{ V.}$$

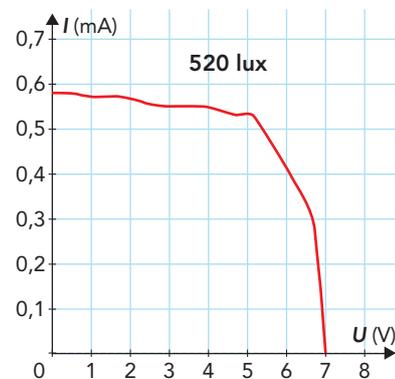
4 Pour $E = 260 \text{ lux}$:

$$I_{cc} = 0,32 \text{ mA} \quad \text{et} \quad U_{co} = 6,87 \text{ V.}$$

Pour $E = 130 \text{ lux}$:

$$I_{cc} = 0,18 \text{ mA} \quad \text{et} \quad U_{co} = 6,67 \text{ V.}$$

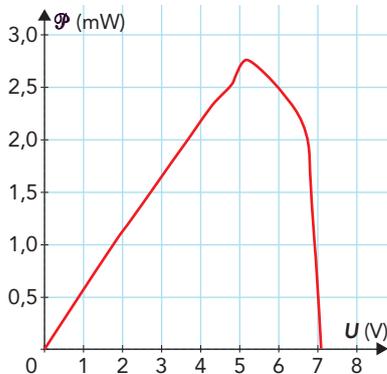
L'intensité I_{cc} dépend nettement de l'éclairement, contrairement à la tension U_{co} .



5 $\mathcal{P} = U \cdot I$

I (mA)	0,58	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,53	0,52	0,33	0,23	0,17	0,00
U (V)	0,00	1,13	2,26	2,78	3,86	4,35	4,79	5,27	6,58	6,79	6,87	7,05
\mathcal{P} (mW)	0,00	0,64	1,27	1,53	2,12	2,35	2,54	2,74	2,17	1,56	1,17	0,00

6 Caractéristique puissance-tension, $\mathcal{P} = f(U)$:



La caractéristique présente un maximum.

7 Puissance maximale :

$$\mathcal{P}_m = 2,74 \text{ mW} = 2,74 \times 10^{-3} \text{ W}$$

8 a. $S = 3,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ (6,5 cm \times 5,0 cm)

b. $\eta = \frac{\mathcal{P}_m}{E \cdot S}$ avec $E = 520 \text{ lux} = 5,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

soit : $\eta = \frac{2,74 \times 10^{-3}}{16,9 \times 10^{-3}} = 0,162 = 16,2 \%$

B Relation intensité-éclairage ; associations de cellules

9 Par rapport au montage du document 6, on retire le voltmètre et on remplace le potentiomètre par un fil. L'intensité mesurée par l'ampèremètre est alors l'intensité en court-circuit, I_{cc} . Pour différents éclairagements mesurés avec le luxmètre, on relève les valeurs de l'intensité I_{cc} correspondantes.

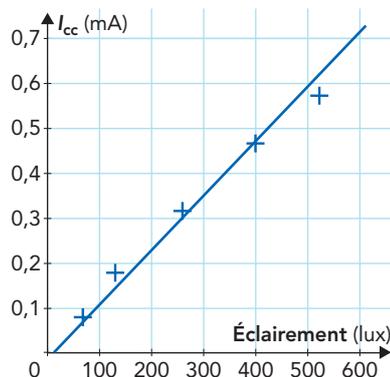
10 Mise en œuvre du montage et réalisation des mesures.

Tableau de mesures à compléter (pour les élèves) :

E (V)				
I_{cc} (mA)				

E (V)	70	130	260	400	520
I_{cc} (mA)	0,08	0,18	0,32	0,47	0,58

11 On trace le graphe $I_{cc} = f(E)$.



La représentation graphique est approximativement une droite qui passe par l'origine, donc l'intensité en court-circuit est proportionnelle à l'éclairage. On a donc une relation de la forme :

$$I_{cc} = k \cdot E$$

12 Association de C_1 et C_2 en série : loi d'additivité des tensions en circuit ouvert, $U_{co} = U_{co1} + U_{co2}$.

Association de C_1 et C_2 en parallèle : loi des nœuds sur les intensités, $I_{cc} = I_{cc1} + I_{cc2}$.

4 Synthèse et propriétés d'un savon (p. 156)

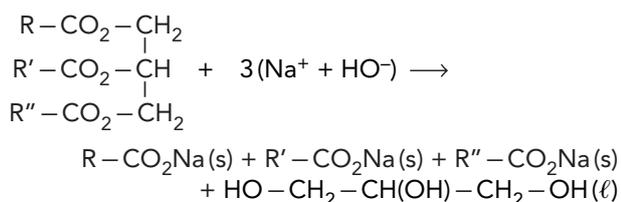
A Fabrication d'un savon

Matériel et produits

- De la verrerie organique nécessaire pour un montage à reflux (support, pince, noix, ballon monocol, réfrigérant à eau);
- un élévateur à croisillons;
- un chauffe-ballon ou un agitateur magnétique chauffant;
- de la pierre ponce ou un turbulent ovoïde;
- des éprouvettes graduées de 25 mL;
- un erlenmeyer de 250 mL;
- un dispositif de filtration sous pression réduite (fiolle à vide, trompe à eau, filtre Buchner, papier-filtre, support, noix, pince);

- un verre de montre;
- des tubes à essais munis de bouchon et dans leur support;
- une solution de soude (hydroxyde de sodium) à $10 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de l'huile alimentaire;
- de l'éthanol (alcool à 95°).
- une solution saturée de chlorure de sodium;
- de l'eau distillée.

1 L'équation de la réaction de saponification est la suivante :



2 L'huile et l'hydroxyde de sodium ne sont pas miscibles; en revanche, ils sont tous les deux solubles dans l'éthanol. Celui-ci joue le rôle de solvant et favorise le contact entre les réactifs.

3 Le chauffage à reflux permet d'élever la température du mélange réactionnel et de rendre ainsi la réaction plus rapide. La réaction étant d'autant plus rapide que la température est élevée, il est inté-

ressant de porter le mélange à ébullition afin que l'évolution du système soit la plus rapide possible. Pour ne perdre ni réactifs ni produits, il est nécessaire de recondenser les vapeurs produites lors de l'ébullition, d'où le reflux réalisé à l'aide d'un réfrigérant à eau.

4 En versant le contenu du ballon dans une solution concentrée de chlorure de sodium, on favorise la précipitation du savon formé, celui-ci étant très peu soluble dans les solutions ioniques (ceci est vérifié dans la partie **B** de la manipulation).

5 L'expérience réalisée dans le tube à essais met en évidence les propriétés tensioactives du savon obtenu. Le savon est amphiphile, hydrophile par le groupe carboxylate et lipophile par sa longue chaîne carbonée.

B Quelques propriétés des savons

Matériel et produits

- Des tubes à essais munis de bouchons dans un portoir;
- des pipettes Pasteur;
- des agitateurs en verre;
- une solution savonneuse préparée par filtration d'un mélange obtenu par agitation de 2 ou 3 g de savon ordinaire (dit savon de Marseille) dans environ 100 mL d'eau distillée tiédie;
- une solution saturée de chlorure de sodium;
- une solution d'acide chlorhydrique $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$ à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;

- des solutions de chlorure de calcium, $\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$, de chlorure de magnésium, $\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$, de chlorure de fer(III), $\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 3 \text{Cl}^-(\text{aq})$, toutes à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- une solution d'EDTA à $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
- de l'eau déminéralisée;
- des eaux minérales de Volvic (eau douce) et de Contrexéville (eau dure).

6 Soit S la solution savonneuse disponible.

- Dans un tube à essais, introduire 2 mL de S, puis ajouter quelques gouttes de la solution d'acide chlorhydrique, $\text{H}_3\text{O}^+(\text{aq}) + \text{Cl}^-(\text{aq})$, à $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Dans trois tubes à essais, introduire 2 mL de S, puis ajouter :
 - au premier, quelques gouttes de la solution de chlorure de calcium, $\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$, à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
 - au deuxième, quelques gouttes de la solution de chlorure de magnésium, $\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$, à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$;
 - au troisième, quelques gouttes de la solution de chlorure de fer(III), $\text{Fe}^{3+}(\text{aq}) + 3 \text{Cl}^-(\text{aq})$, à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.
- Agiter chacun des tubes et noter dans chaque cas les observations faites avant et après agitation.

Les conditions favorables à l'action détergente d'un savon se déduisent de ces expériences : l'eau utilisée pour les lessives ne doit pas être acide et ne doit pas contenir des espèces ioniques trop concentrées.

7 • Dans trois tubes à essais, introduire 2 mL de S, puis ajouter :

- au premier, 2 mL d'eau déminéralisée;
- au deuxième, 2 mL d'eau de Volvic;
- au troisième, 2 mL d'eau de Contrexéville.
- Agiter chacun des tubes et noter dans chaque cas les observations faites avant et après agitation.
- Dans un tube à essais, introduire 2 mL de S, puis 2 mL de solution d'EDTA à $0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, puis 2 mL d'eau de Contrexéville; agiter et observer.

Afin de montrer le rôle de l'EDTA, jadis présent dans certaines lessives, on pourra refaire cette dernière manipulation en introduisant à la place de l'eau de Contrexéville, soit la solution de chlorure de calcium, $\text{Ca}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$, à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, soit la solution de chlorure de magnésium, $\text{Mg}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{Cl}^-(\text{aq})$, à $0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

Commentaires :

En complexant les ions calcium, Ca^{2+} , et magnésium, Mg^{2+} , l'EDTA permet au savon de mousser, ce qui est une propriété caractéristique des tensioactifs.

5 Synthèse de cristaux liquides (p. 157)

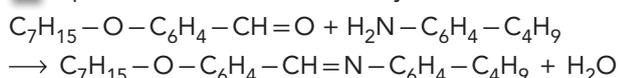
A Synthèse

Matériel et produits

- De la verrerie organique nécessaire pour un montage à reflux (support, pince, noix, ballon monocol, réfrigérant à eau);
- un élévateur à croisillons;
- un chauffe-ballon ou un agitateur magnétique chauffant;
- de la pierre ponce ou un turbulent ovoïde;
- une balance au 0,01g;
- des éprouvettes graduées de 10 mL et de 25 mL;
- une pipette Pasteur;

- un dispositif de filtration sous pression réduite (fiolle à vide, trompe à eau, filtre Buchner, papier-filtre, support, noix, pince);
- un verre de montre;
- une spatule;
- du 4-heptyloxybenzaldéhyde;
- du 4-butylaniline;
- de l'éthanol;
- de l'éthanol froid;
- de l'acide éthanoïque.

1 Équation de la réaction de la synthèse :

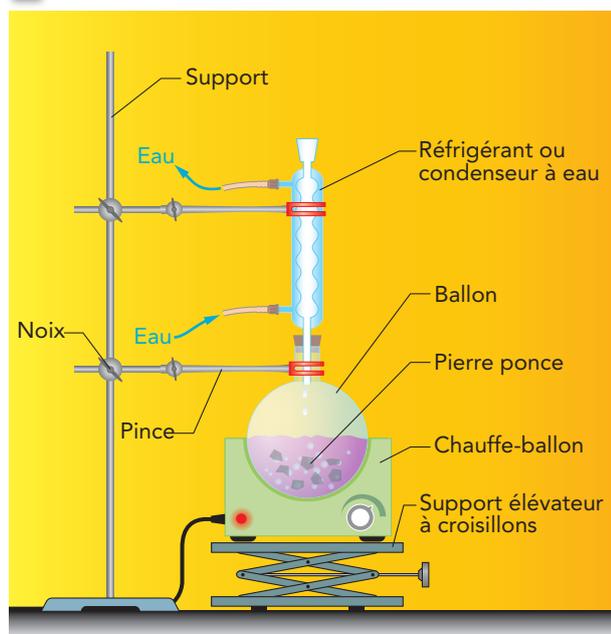


En Terminale, cette réaction peut être vue comme une substitution, bien qu'il s'agisse en fait d'une addition suivie d'une élimination.

2 D'après la note indiquée en **Info**, l'éthanol joue le rôle de solvant; en dissolvant les deux réactifs et en les plaçant dans une même phase, il favorise leur interaction.

L'acide éthanoïque catalyse la réaction (le milieu doit être acide pour accroître le caractère électrophile de l'atome de carbone de l'aldéhyde, mais pas trop afin de ne pas trop protoner l'atome d'azote de l'amine qui perdrait alors sa nucléophilie).

3



On utilise un support élévateur afin de pouvoir régler l'ébullition et retirer le chauffe-ballon sans difficulté en fin de réaction.

4 On rince avec de l'éthanol afin d'éliminer les impuretés (c'est-à-dire les réactifs ou l'acide éthanoïque) contenues dans le produit obtenu, l'imine.

Cet éthanol doit être froid, car, comme la plupart des composés organiques, l'imine est beaucoup moins soluble à froid qu'à chaud; on élimine ainsi les impuretés sans trop perdre de produit.

On arrête l'aspiration pendant le rinçage pour réaliser un rinçage efficace en permettant à l'éthanol d'être bien en contact avec le produit à rincer sans dissoudre celui-ci avec un flot continu d'éthanol.

B Recristallisation

Matériel et produits

- Un erlenmeyer;
- un réfrigérant à air (long tube de verre monté sur un bouchon s'adaptant à l'erlenmeyer);
- un bécher de 50 mL;
- un récipient pour un mélange glace-sel;
- un dispositif de filtration sous pression réduite (fiolle à vide, trompe à eau, filtre Buchner, papier-filtre, support, noix, pince);
- un verre de montre;
- une spatule;
- une balance au 0,01g;
- de l'éthanol froid;
- du sel de cuisine;
- de la glace pilée.

5 Comme l'indique la note en **Info**, l'imine synthétisée est soluble à chaud dans l'éthanol, mais très peu à froid, d'où son choix pour la recristallisation : l'imine, les réactifs et l'acide éthanoïque sont solubles à chaud dans l'éthanol, alors qu'à froid seule l'imine précipite ce qui permet de la purifier, puis de l'extraire par filtration.

Le mélange glace-sel permet d'obtenir un mélange réfrigérant à une température de l'ordre de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Plus le mélange est refroidi à basse température, plus il se forme de solide lors de la recristallisation, la solubilité de celui-ci dans le solvant étant alors abaissée.

6 Pour savoir si les cristaux sont secs, il suffit, après les avoir laissés à l'étuve une dizaine de minutes, de les peser, de les remettre à l'étuve pendant cinq

minutes, puis de les repeser; ils sont secs dès que leur masse est constante.

7 Initialement, il y a 8,00 mmol d'aldéhyde et 8,60 mmol d'amine, l'aldéhyde est le réactif limitant. 8,00 mmol est la quantité maximale d'imine de masse molaire $M = 351 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Le rendement de cette synthèse vaut :

$$\rho = \frac{m_{\text{imine}}}{8,00 \times 10^{-3} \times 351} = 0,356 m_{\text{imine}}$$

Lors de nos synthèses, nous avons trouvé $\rho = 0,67$, soit 67 %. Le rendement n'est pas de 100 %, car :

- l'avancement maximal de la réaction n'a peut-être pas été atteint;
- le mélange contenant l'imine synthétisée est constitué d'un solide, l'imine, et d'une solution saturée d'imine qui va donc être éliminée;
- un peu d'imine est perdue lors des filtrations, des rinçages...

C Mise en évidence du comportement de cristal liquide

Matériel et produits

- Une coupelle en verre;
- une plaque chauffante;
- un banc Kofler et ses solides étalons;
- une spatule;
- une loupe.

8 Avec la plaque chauffante et en observant avec une loupe, on voit nettement les deux transitions : tout d'abord le passage de l'état solide à l'état de cristal liquide opaque, puis le passage à l'état liquide transparent.

Avec le banc Kofler, on observe le passage de l'état solide à l'état de cristal liquide opaque vers $\theta_1 \approx 58 \text{ }^\circ\text{C}$ et le passage à l'état liquide vers $\theta_2 \approx 63 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dans cette imine, la partie rigide lui conférant ses propriétés de cristal liquide est la liaison $-\text{C}=\text{N}-$ qui associe les deux cycles et leur donne une structure en bâtonnet.

Résolution de problèmes scientifiques

2 Des supraconducteurs pour l'imagerie médicale (p. 160)

On peut reprendre les étapes suggérées par l'aide de la page 160 du manuel pour montrer que l'intensité nécessaire pour produire le champ magnétique demandé est trop élevée.

■ Calcul de l'intensité du courant permettant d'obtenir $B = 11,7 \text{ T}$ avec la formule fournie :

$$I = \frac{B}{4\pi \times 10^{-7} \times n}$$

Ici $n = 1000$, d'où :

$$I = \frac{11,7}{4\pi \times 10^{-7} \times 10^3} = 9,31 \times 10^3 \text{ A.}$$

■ Puissance électrique reçue par effet Joule par le fil :

$$\mathcal{P} = R \cdot I^2$$

Il faut calculer R avec la formule :

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{s}$$

Or : $\ell = \pi \cdot D \cdot n$ et $s = \frac{\pi d^2}{4}$;

d'où :
$$R = \frac{4 \rho \cdot D \cdot n}{d^2}$$

soit :
$$R = \frac{4 \times 1,7 \times 10^{-8} \times 1 \times 10^3}{(10^{-3})^2} = 68 \Omega$$

et :
$$\mathcal{P} = 68 \times (9,31 \times 10^3)^2 = 5,89 \times 10^9 \text{ W}$$

$$\mathcal{E} = m \cdot c \cdot \Delta\theta$$

Il faut calculer m en utilisant la formule $m = \mu \cdot V$;

soit :

$$m = \mu \cdot \ell \cdot s = \frac{8,92 \times 10^3 \times \pi \times 1 \times 10^3 \times \pi \times (10^{-3})^2}{4} = 22,0 \text{ kg}$$

et :

$$\mathcal{E} = 22,0 \times 390 \times (1083 - 25) = 9,08 \times 10^6 \text{ J.}$$

La température de fusion du fil est atteinte en une durée Δt telle que :

$$\Delta t = \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{P}}$$

soit :
$$\Delta t = \frac{9,08 \times 10^6}{5,89 \times 10^9} = 1,54 \text{ ms.}$$

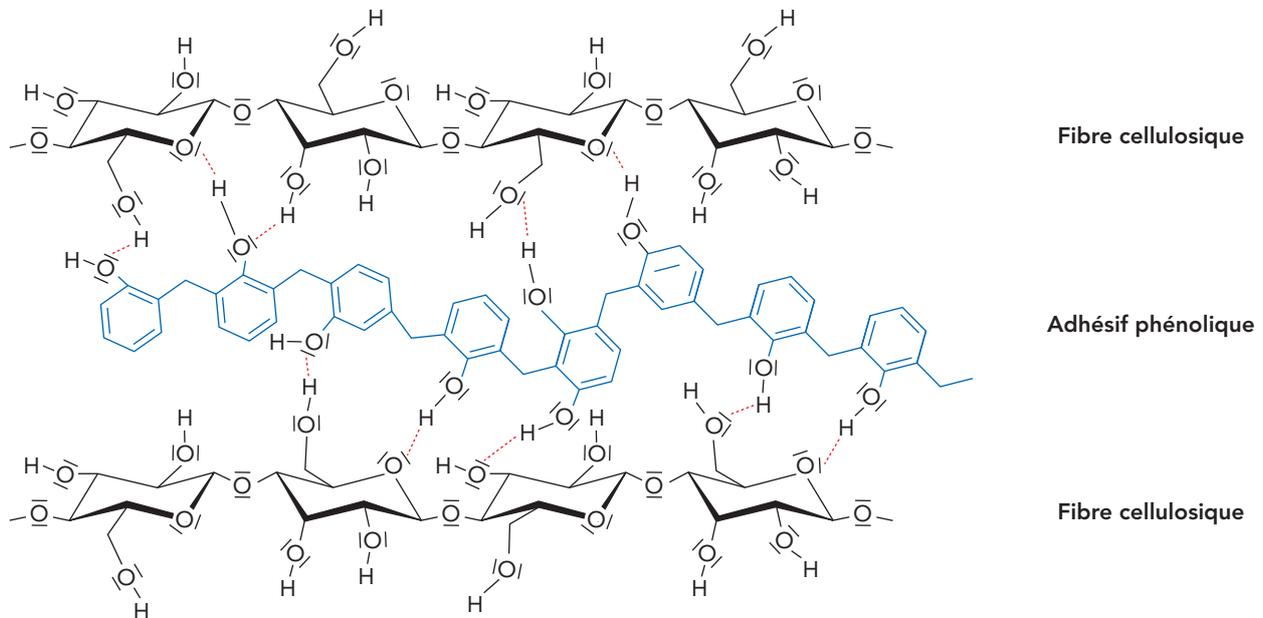
Il est impossible de réaliser de façon durable, donc utilisable, un champ magnétique de 11,7 T avec un solénoïde en cuivre; seule l'utilisation de matériaux supraconducteurs à très basse température permet la création d'un tel champ.

3 Comment la colle colle-t-elle? (p. 161)

Dans les deux cas, il faut lier deux panneaux de bois, de carton ou de papier, assimilés à leur constituant essentiel, la cellulose, avec l'un des adhésifs.

Lors de l'utilisation d'un adhésif phénolique, dissous

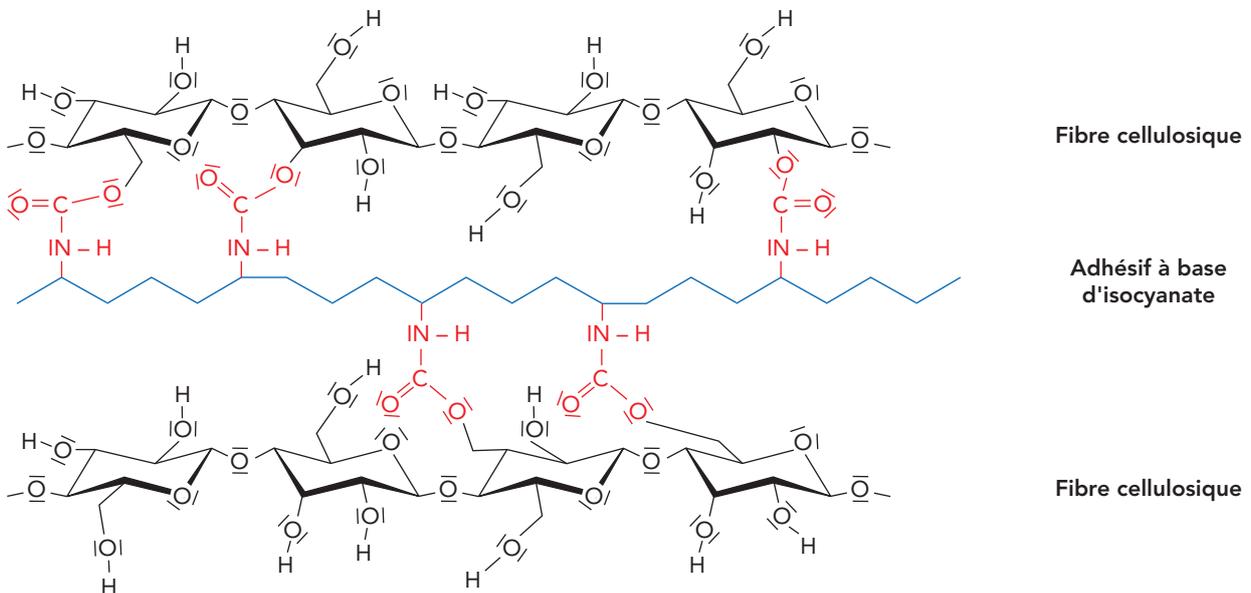
dans un solvant, il se forme des liaisons hydrogène entre les groupes hydroxyles de la cellulose et les groupes hydroxyles des groupes phénoliques.



Les deux fibres celluloses sont unies grâce aux **liaisons hydrogène** (----) formées avec l'adhésif phénolique.

Ces liaisons vont être de plus en plus nombreuses et de plus en plus fortes au fur et à mesure de l'évaporation du solvant, les macromolécules d'adhésif s'insérant alors efficacement dans les fibres des panneaux. Un adhésif phénolique est une colle à prise physique.

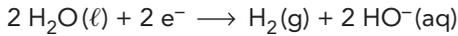
Lors de l'utilisation d'un adhésif à base d'isocyanate, une réaction chimique se produit entre les fonctions alcool de la cellulose et les fonctions isocyanate de la colle conduisant à la formation de polyuréthane liant ainsi deux panneaux. Un adhésif à base d'isocyanate est une colle à prise chimique.



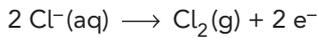
Les deux fibres celluloses sont unies grâce à la formation de **polyuréthane** par réaction chimique avec l'adhésif à base d'isocyanate.

4 Électrolyseur à membrane (p. 161)

Lors de l'électrolyse d'une solution aqueuse de chlorure de sodium, on observe la réduction de l'eau à la cathode selon la réaction électrochimique d'équation :



et l'oxydation des ions chlorure à l'anode selon la réaction électrochimique d'équation :



Sans séparation des compartiments anodique et cathodique, le dichlore formé à l'anode réagit avec les ions hydroxyde qui apparaissent à la cathode selon la réaction d'équation :



Cette réaction, utilisée pour la synthèse de l'eau de

Javel, doit être en général évitée afin d'obtenir, par exemple, de l'hydroxyde de sodium très pur.

Pour éviter cette réaction parasite il faut empêcher le contact entre ses deux réactifs. La solution industriellement retenue consiste à utiliser une membrane semi-perméable qui ne laisse passer que les cations (donc pas les anions tels que les ions hydroxyde). Cette membrane doit repousser les anions; elle doit donc porter des greffons anioniques, c'est le cas des polymères sulfoniques (1) ou carboxyliques (3). Le milieu étant nettement basique, en raison de la formation des ions hydroxyde, et présentant donc un pH voisin de 12, ces deux polymères, vu leur pK_A , seront majoritairement sous forme d'anions sulfonate $\text{R}-\text{SO}_3^-$ et carboxylate $\text{R}-\text{CO}_2^-$.

5 Niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque au silicium (p. 162)

$$\mathcal{E}_G = \Delta\mathcal{E}_n + \Delta\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_C - \mathcal{E}_V = 1,12 \text{ eV};$$

$$\mathcal{E}_V = 0 \text{ eV pris comme référence, donc } \mathcal{E}_C = 1,12 \text{ eV};$$

$$T = 300 \text{ K}.$$

Lorsqu'un électron passe de la bande de valence à la bande de conduction, un trou se forme dans la bande de conduction. On a donc toujours $n = p$;

$$\text{soit : } N_C \cdot \exp\left(-\frac{\Delta\mathcal{E}_n}{kT}\right) = N_V \cdot \exp\left(-\frac{\Delta\mathcal{E}_p}{kT}\right)$$

$$\begin{aligned} \text{D'où : } \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) &= -\frac{\Delta\mathcal{E}_p}{kT} + \frac{\Delta\mathcal{E}_n}{kT} = \frac{\mathcal{E}_V - \mathcal{E}_{\text{Fi}} + \mathcal{E}_C - \mathcal{E}_{\text{Fi}}}{kT} \\ &= \frac{\mathcal{E}_V + \mathcal{E}_C - 2\mathcal{E}_{\text{Fi}}}{kT} \end{aligned}$$

On en déduit :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\text{Fi}} &= \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\mathcal{E}_C + \mathcal{E}_V - k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right) \right) \right] \\ &= 0,5 \times \left[1,12 - 8,6 \times 10^{-5} \times 300 \times \ln\left(\frac{2,82 \times 10^{19}}{1,83 \times 10^{19}}\right) \right] \\ &= 0,55 \text{ eV}. \end{aligned}$$

On retrouve bien : $\mathcal{E}_V < \mathcal{E}_{\text{Fi}} < \mathcal{E}_C$.

6 Conception d'un détecteur d'inondation (p. 163)

Le détecteur doit déclencher l'allumage d'une DEL lorsqu'il est atteint par l'eau de l'inondation.

Le détecteur est constitué d'une lame de cuivre et d'une lame de zinc placées côte à côte et qui délivreront une tension lorsque l'eau les atteindra. En l'absence d'eau, la tension aux bornes du détecteur est nulle. En présence d'eau, elle vaut 0,5 V environ.

La DEL doit être branchée dans le sens passant du courant lorsque la pile débite du courant et doit être soumise à une tension d'au moins 2 V pour s'allumer.

Comme elle est branchée en série avec sa résistance de protection, la tension U à laquelle doit être soumis l'ensemble doit être telle que : $U = U_S + R \cdot I$.

Il faut donc que l'ensemble soit soumis à une tension supérieure à 2 V.

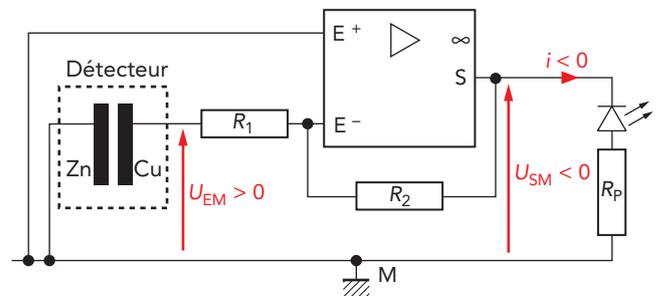
La pile cuivre-zinc constituée ne peut délivrer qu'une tension de 0,5 V. On peut donc utiliser un montage amplificateur inverseur pour élever cette tension afin d'atteindre une valeur suffisante pour allumer la diode.

Avec $R_2 = 5 R_1$ on obtiendrait une tension en sortie de l'amplificateur de valeur cinq fois plus grande que

la tension d'entrée. Pour une tension d'entrée de 0,5 V, on obtient en sortie $U_{\text{SM}} = -2,5 \text{ V}$.

En réalité, lorsque la pile débite un courant, la tension entre ses bornes est inférieure à 0,5 V. Il faut alors plutôt envisager $R_2 = 10 R_1$.

Le schéma de montage proposé est donc présenté ci-dessous :



Pour fonctionner, il faut placer les deux lames de zinc et de cuivre à la hauteur à laquelle on veut détecter l'inondation.

En travaux pratiques, on les placera dans un bécher qu'on remplira d'eau pour en vérifier le fonctionnement.

7 Générateur photovoltaïque versus centrale nucléaire (p. 164)

Une centrale nucléaire fournit une puissance électrique de l'ordre de 900 MW.

La courbe $I = f(U)$ pour un éclairement $E = 1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ permet de déduire la puissance électrique fournie par un module photovoltaïque en relevant plusieurs points de fonctionnement possibles sur cette courbe et en déterminant où se trouve le maximum de puissance (voir le tableau ci-dessous).

On peut donc estimer la puissance maximale fournie par cette cellule à $\mathcal{P}_{\text{max}} = 22 \text{ W}$.

Le nombre de modules nécessaires est donc égal à :

$$N = \frac{900 \times 10^6}{22} = 4,1 \times 10^7$$

soit une surface totale :

$$S_{\text{tot}} = N \cdot S = 4,1 \times 10^7 \times 0,150 = 6,1 \times 10^6 \text{ m}^2$$

soit 6,1 km².

Plusieurs commentaires doivent être apportés à ce résultat :

- bien que la surface trouvée soit très importante, elle est cependant sous-estimée, car les 6,1 km² représentent une surface active de cellules sans tenir compte des espaces entre chaque module qui ne peuvent être accolés de manière jointive et continue sur une surface étendue. En effet, à la latitude de la France, les panneaux doivent être inclinés à 45° afin de bénéficier d'un éclairement à peu près perpendiculaire lorsque le Soleil est au zénith;
- l'ensoleillement n'étant effectif que pendant le jour, il faudrait probablement multiplier par deux cette surface pour être équivalent à une centrale qui fonctionne jour et nuit;
- un ensoleillement de $1000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ est une valeur surestimée pour la France métropolitaine. On estime à $700 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ l'ensoleillement dans les régions méditerranéennes.

U (V)	5	10	15	17	20	22	23
I (A)	1,45	1,4	1,35	1,25	1,0	0,5	0,1
\mathcal{P} (W)	7,25	14	20,3	21,3	20	11	2,3

Bibliographie et sitographie

Bibliographie

- É. GUYON et coll., *Matière et matériaux*, Belin, 2011.
- G. PIETRYK et coll., *Panorama de la physique*, Belin, 2008.
- C. RAY et coll., *La physique par les objets quotidiens*, Belin, 2009.
- M. DEFRANCESCHI, *La chimie au quotidien*, Ellipses, 2006.
- J.-P. PEREZ et coll., *Électromagnétisme – Vide et milieux matériels*, Masson, 1991.
- A. LABOURET, P. CUMUNEL, J.-P. BRAUN, B. FARAGGI, *Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque*, Collection ETSF, Dunod, 2005.

Sitographie

- Site supraconductivité : <http://www.supraconductivite.fr>
- Encyclopédie en ligne Wikipédia – *Semi-conducteurs et Supraconducteurs*.
- « Les cellules photovoltaïques », *Les Défis du CEA*, n° 131, mai 2008, p. 16-17 ; http://defis.cea.fr/defis/131/cea_defis131_16_17.pdf
- Animation flash : <http://defis.cea.fr/defis/131/animation.htm>
- « Technologies pour l'énergie : les bâtisseurs du solaire », *Les Défis du CEA*, n° 160, mai 2011, p. 6-10 ; http://defis.cea.fr/defis/150/CEA%20150_p06-10.pdf
- « Les cellules photovoltaïques », *Les Défis du CEA*, n° 159, avril 2011, p. 16-17 ; <http://defis.cea.fr/defis/159/cellules-photovoltaïques-fonctionnement-defisCEA.pdf>
- Site du CEA : *Domestiquer l'énergie solaire* http://www.cea.fr/jeunes/themes/l_energie/les_energies_du_21eme_siecle/domestiquer_l_energie_solaire http://www.cea.fr/jeunes/themes/les_energies_renouvelables/le_soleil/le_soleil_domestique
- *L'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie*, *Clefs CEA*, n° 50-51, hiver 2004-2005 ; http://www.cea.fr/technologies/l_hydrogene_les_nouvelles_technologies_de_l_ene
- S. AVRIL, *Efficacité du solaire et du photovoltaïque*, Vidéothèque du CEA, 3 juin 2010 (17 min) ; <http://www-centre-saclay.cea.fr/fr/Efficacite-et-solaire-photovoltaïque-par-Sophie-Avril.-Colloque-l-tese-3-juin-2010>
- *Coup de projecteur sur les supraconducteurs*, Dossier de presse du CEA ; http://www.cea.fr/recherche_fondamentale/coup_de_projecteur_sur_les_supraconducteurs
- « Physique quantique, au cœur de la supraconductivité », *Les Défis du CEA*, n° 159, avril 2011, p. 7-10 ; <http://defis.cea.fr/defis/159/quantique-supraconductivite-spiral2-defisCEA.pdf>

Nouveaux matériaux

Analyse et synthèse de documents scientifiques

1 Des nanotubes de carbone aux nanobagues (p. 166-167)

1 Dans la nature, le carbone se trouve sous deux formes cristallines allotropiques : le graphite et le diamant. On trouve aussi du carbone amorphe dans les suies.

2 Le premier fullerène découvert fût le C_{60} dont la structure est identique à celle du dôme géodésique construit par l'architecte américain Richard BUCKMINSTER FULLER à Montréal, en 1967. Le nom de fullerènes a été donné en hommage à cet architecte qui a construit, à grande échelle, ce que la nature a construit à très petite échelle.

Quelques exemples d'applications des fullerènes :

- nanoballons : améliorer les propriétés des lubrifiants, vectoriser des principes actifs, etc. ;
- nanotubes : renforcer des fibres de tissus (pour gilets pare-balles, par exemple) ou en remplacement des fibres de carbone, rendre des surfaces super-hydrophobes, comme source d'électrons pour écrans plats flexibles, etc.

3 Les liaisons de van der Waals s'établissent entre les chaînes carbonées des molécules tensioactives et les atomes de carbone qui forment les nanotubes.

4 Les têtes polaires des molécules tensioactives sont hydrophiles, elles ont une grande affinité pour l'eau et s'orientent donc vers le milieu aqueux.

5 Les molécules tensioactives entourent les nanotubes, leur chaîne hydrophobe étant en contact avec la surface du nanotube et leur tête hydrophile étant en contact avec l'eau. Il se forme alors de petits agrégats de nanotubes de carbone, entourés de molécules tensioactives, en suspension dans le solvant aqueux.

6 Les groupements photo-réactifs contenus dans les molécules tensioactives vont permettre à ces

molécules de se lier solidement par polymérisation afin de créer des structures rigides cylindriques, des nanobagues.

7 La réticulation est la formation de réseaux tridimensionnels entre des molécules à longue chaîne.

On parle de « réticulation des molécules tensioactives », car ces molécules ont de longues chaînes dans lesquelles sont intégrés des groupements photo-réactifs qui, sous l'effet d'un rayonnement UV, vont se lier les uns aux autres, entre molécules voisines, de façon à créer un réseau tridimensionnel.

8 Une électrophorèse est une technique permettant de séparer des molécules.

Lorsque les nanotubes de carbone sont placés dans un champ électrique, les têtes polaires des molécules tensioactives se déplacent le long du tube selon le sens du champ électrique.

9 Les nanobagues sont biocompatibles si les molécules tensioactives qui les constituent le sont. Or, les acides gras sont des molécules tensioactives biocompatibles. Les nanobagues d'acides gras sont donc biocompatibles.

10 Les nanobagues sont de petits cylindres dont la partie intérieure (le cœur) est constituée des chaînes carbonées des molécules tensioactives. Par conséquent, le cœur est hydrophobe. La partie extérieure des bagues constituée des têtes hydrophiles est donc aussi hydrophile.

11 Bilan Si des principes actifs hydrophobes sont intégrés au cœur hydrophobe des nanobagues, celles-ci peuvent les amener jusqu'à l'organe cible. La coque hydrophile, qui « habille » le principe actif hydrophobe, permet de faire circuler ce principe actif dans les liquides biologiques, qui sont des solutions aqueuses.

2 Dépolluer avec des nanotubes de carbone (p. 168)

1 Le filtre est constitué de nanotubes de carbone, déposés sur un feutre de carbone lui-même déposé sur une couche de céramique, et sur lesquels sont greffées des molécules de PAA. Il s'agit donc d'un matériau composite.

2 a. La formule semi-développée de l'acide polyacrylique obtenue à partir de celle de l'acide acrylique est :



La formule semi-développée de l'ion polyacrylate obtenue à partir de celle de l'acide polyacrylique est :



b. Le pK_A du couple acide polyacrylique/ion polyacrylate est peu différent de celui du couple acide acrylique/ion acrylate. Quand le pH du milieu est égal à 7, c'est donc l'ion polyacrylate qui prédomine.

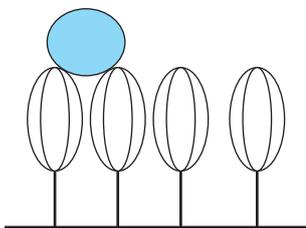
3 L'eau filtrée ayant un pH voisin de 7, l'espèce qui prédomine est donc l'ion polyacrylate, espèce chimique chargée négativement, qui va retenir les cations contenus dans l'eau.

4 La surface des nanotubes de carbone est une électrode, c'est donc à son voisinage que va se produire l'électrolyse de l'eau.

5 Bilan Sur le document 2, on constate que les spectres du film PAA sont identiques avant l'utilisation du filtre et après le rinçage du filtre. Cela permet de vérifier la qualité du rinçage et montre qu'après cette opération le filtre est complètement régénéré. L'étape de captation des cations métalliques est mise en évidence par le spectre caractéristique de l'ion polyacrylate.

3 La super-hydrophobie : un traitement... de surface (p. 169)

1 Schéma de la surface de la feuille de *Salvinia Molesta* et goutte d'eau posée sur les capillaires :



Les parties hydrophiles sont les extrémités des fouets; les parties hydrophobes sont les bases des tiges des fouets.

2 Des exemples de feuilles de végétaux super-hydrophobes sont : le lotus, la tulipe, le magnolia, le ginkgo.

Le nom d'« effet lotus » est donné aux traitements de surface super-hydrophobes par analogie avec la surface des feuilles de lotus qui ont cette propriété.

3 Des exemples de matériaux faisant ou pouvant faire l'objet de traitement super-hydrophobe sont les textiles (traitement déperlant), les vitrages (autonettoyant), les revêtements de façades, etc.

4 En électronique, la lithogravure (on devrait plutôt parler de photolithographie) est une technique per-

mettant de créer des composants électroniques sur une couche mince (le wafer) en insolant une couche de résine. La micro-lithogravure est la même technique, mais ce terme est employé quand les composants électroniques gravés sont plus petits.

5 a. Sur le schéma c du document 2, on voit la goutte d'eau posée sur les plots sans en épouser la surface comme un fakir posé sur un lit de clous dont le corps ne s'enfonce pas entre les clous.

b. Sur le schéma b, l'espacement des plots est tel que l'enveloppe de la goutte d'eau se déforme et épouse la forme des plots.

La surface du matériau n'est donc pas protégée du contact avec l'eau; cette surface n'est pas hydrophobe, ni même super-hydrophobe.

Sur le schéma c, l'espacement des plots est tel que l'enveloppe de la goutte d'eau ne se déforme pas. La surface du matériau est donc protégée du contact avec l'eau; cette surface est hydrophobe et même super-hydrophobe.

6 Bilan Dans la nature, de nombreuses surfaces sont naturellement super-hydrophobes.

On peut ainsi considérer que les surfaces super-hydrophobes synthétiques imitent les surfaces naturellement super-hydrophobes.

4 « Entre terre et mer », la fibre Crabyon® (p. 170)

1 a. La viscose est obtenue à partir de cellulose de bois traitée chimiquement (généralement à la soude) pour rompre les liaisons hydrogène.

b. Un polysaccharide est un polymère du glucose.

c. La chitine et le chitosan ont des propriétés antibactériennes et antifongiques. Si la chitine ou le chitosan sont intégrés à la cellulose, ses propriétés sont présentes dans la nouvelle fibre ainsi créée.

2 La chitine est un polysaccharide particulièrement répandu dans la nature (deuxième polymère naturel après la cellulose). Sa présence dans les carapaces des crustacés en fait un polysaccharide qu'il est facile de se procurer et dont le prix de revient est assez faible, d'où son intérêt économique.

Par ailleurs, sans valorisation de la chitine, les carapaces des crustacés sont rejetées dans la nature. Il est donc écologiquement intéressant d'utiliser ces carapaces et donc la chitine qu'elles contiennent.

3 Sur les formules du document 2, on observe que l'on passe de la chitine au chitosan en remplaçant un

certain nombre de groupes « acétyle » par un atome d'hydrogène. Cela explique le nom donné au procédé chimique d'obtention du chitosan.

4 Le chitosan comporte un certain nombre de groupes amines dont l'atome d'azote a un doublet non liant. En milieu acide, des ions hydrogène viennent se lier aux atomes d'azote, ce qui conduit à la formation de sites chargés positivement dans le chitosan, augmentant ainsi sa solubilité en milieu acide.

5 Bilan La fibre Crabyon® est obtenue par association de chitosan (plutôt que de chitine) et de cellulose. Les propriétés spécifiques de la chitine (et du chitosan), antibactérienne et antifongique, sont ainsi présentes dans la fibre Crabyon®.

Pour aller un peu plus loin, on peut ajouter que ces propriétés sont dues au fait que le chitosan est chargé positivement en milieu acide, ce qui lui permet de se lier aux composés biologiques chargés négativement, comme les membranes des bactéries ou des champignons.

5 Des principes actifs encapsulés (p. 171)

1 Des exemples d'utilisation de microcapsules de protection sont :

- les gants et vêtements thermorégulateurs contenant des microcapsules à cœur de paraffine qui agissent par changement de phase ;
- les textiles dont la couleur change avec la température par micro-encapsulation de substances thermochromes ;
- les textiles et les matériaux retardateurs de flammes (microcapsules de polyuréthane contenant du phosphate d'ammonium).

Des exemples d'utilisation de microcapsules à relargage sont :

- des médicaments dont le principe actif est protégé et amené vers la cible du médicament ;
- des cosmétiques dont les agents hydratants sont amenés et libérés dans une couche profonde de l'épiderme ;
- des mouchoirs parfumés et/ou libérant un produit hydratant pour la peau ou dans les papiers autocopiants sans carbone (microcapsules liées à la cellulose) ;
- des collants à microcapsules d'agents hydratants, odorants, etc.

2 a. Les fibres de coton et de papier sont essentiellement constituées de cellulose.

b. Puisque les microcapsules sont fixées sur la cellulose, il est possible de les fixer de la même manière sur les fibres de coton et de papier.

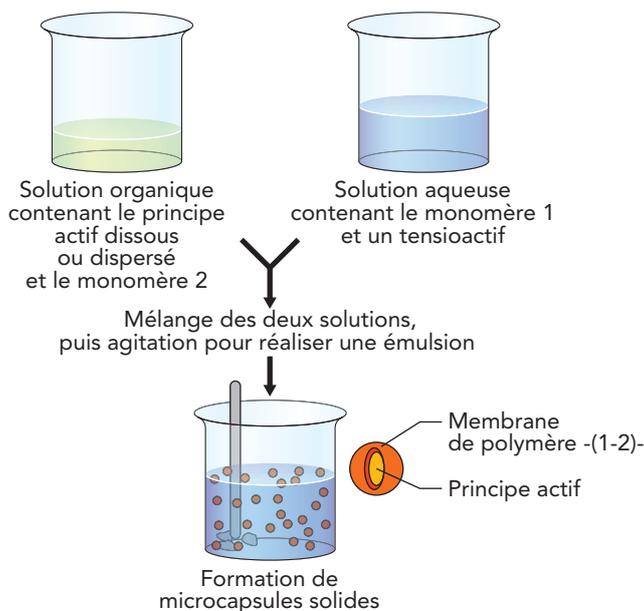
3 Une émulsion est la dispersion d'un liquide en fines gouttelettes au sein d'un autre liquide dans lequel il n'est pas miscible (exemple : eau et huile). Au bout d'une durée plus ou moins longue, les deux liquides se séparent et forment deux phases distinctes.

Un tensioactif est une molécule constituée d'une partie hydrophile et d'une partie hydrophobe. Les molécules tensioactives entourent donc les gouttelettes, de sorte que l'intérieur de la gouttelette ne soit pas en contact avec le milieu, ce qui stabilise l'émulsion.

4 Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre de motifs de base formés d'un ou plusieurs monomère(s).

Le polymère va former la membrane des microcapsules. L'un des deux monomères est hydrophile et l'autre hydrophobe. Ainsi, le polymère formé est amphiphile et constitue une barrière stable entre le contenu intérieur de la capsule et son environnement extérieur.

5 Bilan Schéma des différentes étapes de la formation d'une microcapsule et de la microcapsule obtenue :



6 Des prothèses biocompatibles (p. 172)

1 a. Les prothèses et les implants sont utilisés en remplacement d'organes ou de tissus qui ont dû être retirés du corps du patient, car non fonctionnels ou lésés.

b. Des exemples de prothèses et d'implants sont :

- la prothèse de la hanche (en remplacement partiel ou total de l'os de la hanche) ou du fémur;
- la couronne dentaire (en remplacement de la couronne naturelle de la dent cassée ou cariée trop profondément);
- l'implant cristallinien (en remplacement du cristallin atteint par la cataracte);
- l'implant dentaire (en remplacement de la racine d'une dent et fixé dans l'os de la gencive);
- le stent (pour éviter le rétrécissement d'un vaisseau sanguin).

2 Les prothèses et les implants doivent être biocompatibles pour s'intégrer plus facilement à l'organisme et limiter les réactions de défense du système immunitaire.

3 a. Les céramiques de phosphate de calcium sont constituées de phosphate de calcium, qui est le constituant de la partie minérale des os et des dents. Ces céramiques sont utilisées depuis une vingtaine d'années en tant que substitut du tissu osseux en chirurgie maxillo-faciale, en ORL, en neurochirurgie, en odontologie, en orthopédie, etc.

Afin de créer des macro-pores identiques à ceux de l'os naturel, des billes de naphthalène sont intégrées à la poudre de phosphate de calcium. À haute température, le naphthalène se sublime laissant des macro-pores dont le diamètre est celui des billes.

Les hydrogels sont des matériaux constitués d'une matrice formée par réticulation de molécules polymères. Ces molécules comportent des groupes hydrophiles qui piègent les molécules d'eau dans les espaces libres de la matrice.

L'acide polylactique est obtenu par polymérisation de l'acide lactique. C'est un polymère entièrement biodégradable utilisé pour les emballages alimentaires ou comme fil de suture en chirurgie, par exemple.

b. Les matériaux biocompatibles peuvent être utilisés en association avec les organismes vivants, car ils n'interfèrent pas avec les milieux biologiques. Les matériaux cités ci-dessus sont biocompatibles, car leurs constituants se trouvent naturellement présents dans le corps humain ou sont des espèces chimiques tolérées par l'organisme.

4 Les molécules bioactives sont des molécules qui possèdent des propriétés biologiques ou qui sont biologiquement actives dans les organismes vivants avec un effet préventif ou curatif.

5 Bilan Les prothèses et les implants doivent être biocompatibles, il faut donc utiliser des matériaux spécifiques mis au point et/ou améliorés par la chimie des matériaux. Mais les caractéristiques de ces matériaux sont déterminées par la biologie cellulaire, afin de les rendre le plus biocompatibles possibles, et la médecine régénérative, dont l'objectif est la mise au point de matériaux qui seront remplacés naturellement par l'organisme lui-même.

7 Des vitrages tout en discrétion (p. 173)

1 Les cristaux liquides sont des matériaux qui ont à la fois des caractéristiques d'un liquide et d'un solide (voir manuel élève, p. 152).

2 Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre de motifs de base formés d'un ou plusieurs monomère(s).

Le film actif est un matériau composite, car constitué de gouttelettes de cristaux liquides piégées dans un film polymère. Le rôle du film est de maintenir les gouttelettes de cristaux liquides immobiles. Le rôle des billes de silice est de maintenir constante l'épaisseur du film polymère.

3 Lorsqu'une tension est appliquée, les molécules de cristaux liquides sont toutes alignées selon la même direction. Les gouttelettes forment donc un matériau homogène dont l'indice de réfraction a une valeur donnée. Si le film polymère a un indice de réfraction de même valeur, le film actif a, dans son ensemble, le même indice de réfraction partout. Il constitue donc un matériau homogène du point de

vue optique, la lumière le traverse alors comme si elle traversait un simple vitrage de verre.

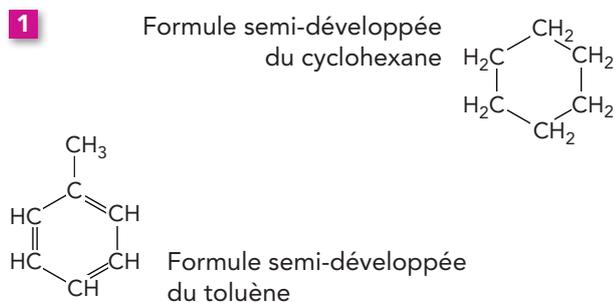
4 a. Un brouillard diffuse la lumière, car il contient des micro-gouttelettes d'eau dont la taille est telle qu'elles absorbent la lumière qu'elles reçoivent et la réémettent dans toutes les directions. Si la lumière qu'elles reçoivent est de la lumière blanche (celle du Soleil, par exemple), le brouillard est blanc (voir la diffusion de Mie).

b. Lorsqu'aucune tension n'est appliquée, les cristaux liquides dans les gouttelettes sont orientés différemment d'une gouttelette à une autre. Le matériau est donc globalement hétérogène du point de vue optique, chaque goutte se comportant comme les gouttelettes d'eau d'un brouillard. La diffusion de Mie explique que le vitrage est alors diffusant.

5 Bilan Les cristaux liquides du film actif peuvent donc être, soit tous alignés selon la même direction sous l'effet d'un champ électrique, le vitrage est alors transparent, soit orientés aléatoirement, en l'absence de champ électrique, le vitrage est alors diffusant.

Pratique expérimentale

1 Comprendre un procédé de fabrication : comment synthétiser des nanotubes de carbone ? (p. 174-175)



2 Un précurseur est une espèce chimique qui permet d'initier une réaction chimique et, dans ce cas, de contrôler le lieu où elle se produit.

3 Les atomes de carbone qui forment les nanotubes proviennent essentiellement de l'hydrocarbure et, dans une moindre mesure, du précurseur.

4 Un aérosol est composé de particules (solides ou liquides) en suspension dans un gaz. L'hélium, le néon, l'argon sont des gaz chimiquement inertes.

5 La température d'ébullition du cyclohexane est 80,8 °C et celle du toluène est 110,6 °C.

La température du tube évaporateur (environ 200 °C) permet donc l'évaporation de l'hydrocarbure.

6 Il ne faut pas que les atomes de carbone réagissent avec le gaz de l'aérosol, il faut donc un gaz inerte vis-à-vis du carbone.

7 Une température élevée permet de rompre les liaisons covalentes qui existent entre les atomes des molécules présentes dans l'aérosol.

8 Les atomes de fer du ferrocène jouent le rôle de précurseur, car les nanotubes se développent sur les nanoparticules de fer.

9 La durée de l'injection influence la longueur des nanotubes.

10 L'aérosol est injecté régulièrement pour amener des atomes de carbone afin de permettre la poursuite de la croissance des nanotubes.

11 L'enceinte ventilée permet de décrocher les nanotubes de la surface et de les souffler dans un bac de récupération, car les nanotubes sont trop petits pour être récupérés un à un.

12 Ce procédé de fabrication permet de contrôler la longueur des nanotubes formés par la durée de l'injection et de contrôler le diamètre par le choix du précurseur.

13 a. Le graphène est une structure cristalline de carbone dans laquelle les atomes de carbone forment des plans.

b. Parmi les atomes de carbone injectés dans le réacteur, certains ne s'associent pas entre eux pour former les nanotubes, mais forment de petites structures planes, du graphène.

14 Les principales caractéristiques des nanotubes de carbone sont :

- une très grande résistance mécanique (plus de 200 fois celle de l'acier);
- conducteur ou semi-conducteur selon le type d'enroulement du tube;
- l'émission d'électrons quand ils sont soumis à un champ électrique;
- les possibilités d'être tressés ou tissés pour former des « câbles » de carbone ou des textiles;

– la possibilité de les utiliser comme cage moléculaire ou de greffer des molécules à leur surface.

15 Les nanotubes de carbone peuvent être utilisés pour renforcer des fibres de tissus (pour des gilets pare-balles, par exemple), en remplacement des fibres de carbone, pour rendre des surfaces super-hydrophobes, comme source d'électrons pour des écrans plats flexibles, etc.

2 Comment obtenir une surface super-hydrophobe ? (p. 176)

1 La mesure de l'angle de contact du liquide se fait directement sur l'image.

2 En fonction de la valeur mesurée pour l'angle de contact, la surface a acquis, ou non, un caractère hydrophobe ou super-hydrophobe.

Il est nécessaire de déposer très délicatement la goutte d'eau sur la suie de façon à ne pas déplacer la suie qui n'adhère pas à la plaque de verre.

3 Les fumées issues de la combustion de matières organiques contiennent des gaz (principalement du dioxyde de carbone, de l'eau, du monoxyde de carbone), du carbone (sous forme de microcristaux de graphite) et des composés organiques partiellement brûlés. Ces derniers, le carbone et les composés organiques, se retrouvent dans la suie.

La matière organique dont on utilise ici la suie est le bois de l'allumette.

4 Les atomes de carbone des microcristaux de graphite, ainsi que les composés organiques présentent un caractère hydrophobe. Le dépôt de suie uniforme sur la surface de verre empêche la goutte d'eau de s'étaler, ce qui se traduit par un caractère hydrophobe ou super-hydrophobe de la surface.

5 La plaque de verre est nano-structurée en surface. Les particules responsables de la super-hydrophobie sont de taille nanométrique et seule la surface du matériau a été modifiée pour lui conférer cette propriété.

6 Le revêtement déposé sur le verre n'est pas résistant, car les grains de graphite et les composés organiques ne sont pas liés à la surface du verre et ne sont pas non plus liés entre eux. Il peut donc facilement se fragmenter ou être éliminé de la surface.

3 Comment obtenir des microcapsules ? (p. 177)

1 La gélatine est obtenue à partir de collagène, extrait de couennes de porc, de peaux et d'os de bovins : les os et les peaux sont d'abord dégraissés, puis sont traités, soit à la chaux, soit à l'acide, enfin la gélatine est extraite à l'eau chaude.

La gomme arabique est un épanchement de sève de certains acacias récoltée principalement en Afrique saharienne.

Le collagène est une protéine, donc la gélatine est composée de macromolécules, et la gomme arabique est un polysaccharide, ce qui explique les masses molaires moléculaires élevées.

2 Le bleu de méthylène est choisi, car il teinte le collagène en bleu, ce qui permet de distinguer les coacervats formés.

3 L'étalonnage du microscope est réalisé à l'aide d'une plaquette micrométrique (en général, un objet gradué de 1,00 mm divisé en 100) et d'un oculaire micrométrique. La mesure du nombre de divisions correspondant au diamètre du coacervat permet de déterminer son diamètre.

Les capsules obtenues sont de tailles micrométriques.

Résolution de problèmes scientifiques

2 Des zéolithes pour des textiles innovants (p. 180)

Certains micro-organismes, comme le champignon *Trichoderma reesei*, dégradent les textiles contenant de la cellulose, car ils sont capables de réaliser la saccharification de la cellulose.

L'inclusion de zéolithes dans les fibres permet de les protéger, car certains micro-organismes tels que les

champignons se développent en milieu humide. Or, au voisinage des zéolithes, l'eau subit une électrolyse qui libère du dioxygène et provoque l'oxydation des membranes cellulaires des organismes vivants causant leur mort.

3 Les nanoparticules de dioxyde de titane (p. 181)

Les nanoparticules de dioxyde de titane, TiO_2 , sous forme anatase et rutile, peuvent être utilisées dans les produits cosmétiques de protection solaire, car elles absorbent les rayonnements autour de 400 nm, dans l'ultra-violet proche.

Cependant, la forme anatase a des propriétés photocatalytiques supérieures à celles de la forme rutile. Cette dernière doit donc être préférée pour les cosmétiques afin d'éviter des réactions susceptibles de léser des cellules de la peau voire même l'ADN des cellules.

Afin de ne pas laisser de traces blanchâtres sur la peau, les particules de dioxyde de titane utilisées dans les produits de protection solaire doivent être de taille nanométrique (100-125 nm). Or, à de telles dimensions, les propriétés chimiques sont très différentes de celles des mêmes particules de taille supérieure. Il est donc nécessaire d'étudier très attentivement les propriétés chimiques et la réactivité de particules nanométriques avant de les intégrer à des produits destinés à la commercialisation.

Bibliographie et sitographie

Bibliographie

- « Les matériaux au cœur du processus d'innovation », *Clefs CEA*, n° 59, été 2010.
- « Le nanomonde, de la science aux applications », *Clefs CEA*, n° 52, été 2005.
- G.NÉMOZ et F. ROLAND, « Fibres et textiles chimiques. Matériaux du XXI^e siècle », *L'actualité chimique*, n° 360-361, février-mars 2012.

Sitographie

- Les revues *Clefs CEA* sont téléchargeables sur : http://www.cea.fr/le_cea/publications/clefs_cea
- Site bibliographique destiné aux professionnels de la mer : <http://www.bibliomer.com>
- Site CNRS Nanotechnologies et santé : <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosnano>
- Site universitaire sur les coacervats : <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/ATP/evol1.htm>
- Diaporama sur les zéolithes : http://www.mulhouse.cci.fr/fileadmin/redacteurs/INNOVATION/2_G_n_ralits_s_-_B.LEBEAU.pdf

Exercices Bac

1 L'oxygène : un traceur des courants marins (p. 182-184)

Étude qualitative

1 La solubilité diminue avec la température et avec la salinité.

2 a. Les eaux de surface sont en contact avec le dioxygène de l'atmosphère.

b. Elles peuvent être sous-saturées lors de la respiration des organismes vivants ou de la décomposition des matières organiques, par exemple.

3 a. Dans les eaux profondes, la photosynthèse ne se réalise pas.

b. L'UAO (utilisation apparente de l'oxygène) évalue la différence entre la solubilité du dioxygène, $[O_2]^{sat}$, et sa concentration, $[O_2]^{diss}$, mesurée dans l'eau de mer. L'UAO évalue la consommation biologique du dioxygène depuis le moment où les eaux quittent la surface.

c. Une valeur élevée de l'UAO correspond à des eaux pauvres en dioxygène.

d. Note : les élèves doivent s'aider des documents 1 et 3.

Document 1 : pour une eau de salinité égale, par exemple, à 35 g de sels dissous par kilogramme de solution, la quantité de dioxygène dissous est de $207 \mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ à 25 °C et $348 \mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ à 0 °C. La solubilité augmente quand les eaux sont froides. Ainsi, cette quantité diminue des hautes latitudes (température plus basse) jusqu'au voisinage de l'équateur (température plus élevée).

Document 3 : pour une latitude donnée, les eaux profondes de l'Atlantique Nord sont riches en dioxygène (UAO < $1,2 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$); dans les parties nord des océans Indien et Pacifique, les concentrations sont plus faibles (UAO > $5 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$).

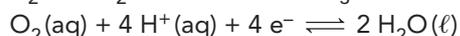
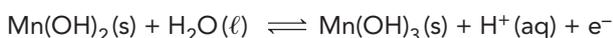
Si l'on regarde la quantité dissoute depuis l'Atlantique Nord pour une longitude donnée (par exemple, 30° O), on constate que la quantité diminue en descendant vers le sud.

Ainsi, l'eau semble se mouvoir de l'Atlantique Nord vers le Pacifique Nord.

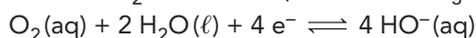
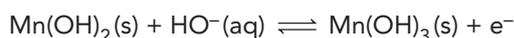
Étude quantitative

1 $\text{Mn}^{2+}(\text{aq}) + 2 \text{HO}^{-}(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Mn}(\text{OH})_2(\text{s})$ (1)

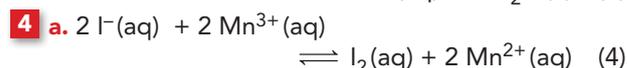
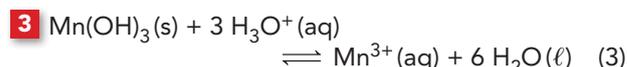
2 a. Pour plus de simplicité, on garde l'ajustement en milieu acide avec les élèves :



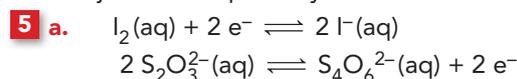
Remarque : en milieu basique, ces équations deviennent :



b. Le mélange est agité pendant 3 heures. Un précipité brun est alors présent dans le flacon (doc. 4) : la transformation est donc lente.



b. C'est une réaction d'oxydoréduction, car l'équation met en jeu des couples oxydant/réducteur.



b. On visualise l'équivalence lorsqu'il y a décoloration.

6 a. b. c. et **7 a. b.**

$$\text{D'après (5) : } 2 n(\text{I}_2) = n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-})$$

$$\text{D'après (4) : } 2 n(\text{I}_2) = n(\text{Mn}^{3+})$$

$$\text{D'après (3) : } n(\text{Mn}(\text{OH})_3) = n(\text{Mn}^{3+})$$

$$\text{D'après (2) : } 4 n(\text{O}_2)^{diss} = n(\text{Mn}(\text{OH})_3)$$

d'où :

$$n(\text{O}_2)^{diss} = \frac{n(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}(\text{aq}))}{4} = \frac{C_2 \cdot V_{2E}}{4} \quad \text{et} \quad [\text{O}_2]^{diss} = \frac{C_2 \cdot V_{2E}}{4V_1}$$

$$\text{c. } [\text{O}_2]^{diss} = \frac{5,0 \times 10^{-3} \times 9,1}{4 \times 50,0}$$

$$= 2,275 \times 10^{-4} \approx 2,3 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$$

8 a. La solubilité du dioxygène dans une eau de mer de salinité $35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ vaut $207 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ à 25 °C.

$$\text{b. } s = \frac{227,5}{207} = 1,1.$$

C'est une valeur élevée que l'on peut, aux erreurs d'expériences près lors du dosage, considérer comme égale à 1.

c. Activité photosynthétique dans les eaux de surface.

$$\text{9 a. } [\text{O}_2]^{sat} = \alpha \cdot P_{\text{O}_2}^{atm}$$

$$= 1,019 \times 10^{-3} \times 0,21 = 2,14 \times 10^{-4}$$

$$= 214 \mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$$

b. Plusieurs pistes de réflexion peuvent être envisagées avec les élèves :

- une incertitude de lecture sur le graphique. Plutôt qu'une lecture sur un abaque, il faudrait calculer la valeur à partir de l'équation de BENSON et KRAUSE (1984) :

$$\ln[\text{O}_2]^{sat} = -135,29996 + \frac{1,572288 \times 10^5}{T}$$

$$- \frac{6,637149 \times 10^7}{T^2} + \frac{1,243678 \times 10^{10}}{T^3}$$

$$- \frac{8,621061 \times 10^{11}}{T^4} - \left(0,020573 - \frac{12,142}{T} \right.$$

$$\left. + \frac{2,3631 \times 10^3}{T^2} \right) \times S$$

$[\text{O}_2]^{sat}$ est la solubilité du dioxygène exprimée en $\mu\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ d'eau de mer ;

T est la température de l'eau de mer exprimée en K;

S est la salinité exprimée en $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ d'eau de mer;

- le pourcentage dans l'air du dioxygène est donnée à 21 % environ (puisque $P_{\text{O}_2}^{\text{atm}}$ est donnée à 0,21 atm); or, la composition de l'air en dioxygène varie sensiblement; par exemple, pour un air sec au voisinage du sol, elle est de 20,946 %; la pression donnée n'est donc qu'une valeur approchée; si l'on prend cette valeur, le calcul donne $213 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$;

- la concentration en dioxygène varie avec la salinité et la salinité est donnée à $35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, sans préciser l'incertitude de mesure attachée à cette valeur; il en est de même pour la valeur de la température donnée ($25 \text{ }^\circ\text{C}$);

- cette température a aussi une influence sur la valeur de α ; par exemple, à $0 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\alpha = 1,670 \text{ mmol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$$

pour une eau de salinité 35 ‰ et à l'équilibre avec l'atmosphère;

- α dépend aussi de la salinité.

- la concentration en dioxygène dans l'eau de mer

n'est égale à la solubilité que s'il y a équilibre entre l'eau et l'air (donc si $P_{\text{O}_2}^{\text{atm}} = P_{\text{O}_2}^{\text{mer}}$); le déséquilibre entre l'océan et l'atmosphère a différentes causes. Une sursaturation peut provenir d'une augmentation de la température, de la production de dioxygène par la photosynthèse, de l'entraînement de bulles d'air à quelques mètres de profondeur par des vagues déferlantes (effet de la pression sur la solubilité des gaz), du mélange entre des masses d'eau de température différentes, etc. Dans le cas de l'oxygène, il faut environ entre une semaine et un mois pour résorber une différence de pression partielle entre les eaux de la couche mélangée et l'atmosphère;

- etc.

Remarque : l'appropriation donnée dans l'énoncé propose qu'un litre de solution a une masse de un kilogramme, ce qui n'est pas le cas pour l'eau salée. Or, le calcul à la question 7c donne un résultat en $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et celui à la question 9a donne un résultat en $\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$. Il y a donc aussi un écart entre les résultats des questions 7c et 9a qui peut être expliqué par cette approximation.

2 Un béton autonettoyant et antipollution (p. 184-186)

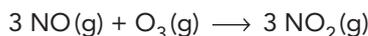
1 Le béton est un matériau composite, car il est constitué d'au moins deux constituants auxquels est ajouté un liant. Cela confère au béton des propriétés que ses constituants pris séparément (gravier, sable, ciment) n'ont pas.

2 Sur le graphe du document 2, on constate que la luminance des quatre façades du bâtiment n'a que très peu diminué au cours des 40 premiers mois suivant la construction de l'édifice. En effet, la diminution de la luminance de la façade sud, qui est la plus importante, reste inférieure à 2 %, bien en dessous de ce qui serait perceptible par l'œil. On peut donc en déduire que son aspect visuel n'a pas changé pendant ce laps de temps. Cependant, il manque des courbes de luminance de façades « témoins » qui n'auraient pas été réalisées avec ce béton autonettoyant, mais seraient soumises aux mêmes conditions extérieures (climats et pollution).

3 Équation de la réaction entre le monoxyde d'azote et le dioxygène :



Équation de la réaction entre le monoxyde d'azote et l'ozone :



4 Dans le test statique, il n'y pas de mouvement d'ensemble des molécules présentes dans l'enceinte. Cependant, le document 6 rappelle que les molécules d'un gaz sont en mouvements incessants. Ces déplacements étant aléatoires, certaines molécules vont heurter la paroi de l'enceinte et réagir avec les nanoparticules de dioxyde de titane qui s'y trouvent. Cela provoque une transformation du dioxyde d'azote en

ions nitrate et donc une diminution de la concentration en dioxyde de titane dans l'enceinte.

5 Les tests dynamiques sont indispensables, car ils font intervenir un facteur qui n'est pas présent dans le test statique : le mouvement d'ensemble des molécules (le vent et les courants d'air). Or, la présence de ces mouvements d'ensemble peut diminuer la probabilité qu'a une particule de heurter la paroi traitée et donc diminuer l'efficacité antipollution du revêtement. Les tests dynamiques permettent ainsi de se rapprocher des situations réelles d'utilisation et d'estimer alors plus précisément l'efficacité du matériau.

6 a. La hauteur de la bande interdite du dioxyde de titane est :

$$\Delta\mathcal{E} = 3,2 \text{ eV} = 3,2 \times 1,6 \times 10^{-19} = 5,1 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Or, $\Delta\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, donc la longueur d'onde du rayonnement permettant de faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction est :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta\mathcal{E}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{5,1 \times 10^{-19}} = 3,9 \times 10^{-7} \text{ m} = 390 \text{ nm}$$

b. La longueur d'onde calculée à la question précédente appartient au domaine des ultraviolets, ce qui justifie l'emploi d'une lampe UV pour les tests.

c. Le document 5 montre que le rayonnement solaire contient des rayonnements ultraviolets, ce qui permet à la lumière solaire de déclencher la photocatalyse de nettoyage par le dioxyde de titane.

7 Les particules de dioxyde de titane doivent être nanométriques, car l'efficacité du dioxyde de titane comme photocatalyseur n'est important, que pour

des particules de taille inférieure à 100 nm, comme l'indique le document 7.

8 Bilan Le rôle du ciment, et donc du béton qui le contient, est double :

– rôle d'auto-nettoyage de la surface : les salissures (dépôts d'hydrocarbures imbrûlés provenant principalement des gaz d'échappement des véhicules) sont transformées en dioxyde de carbone et en eau qui quittent la surface sous forme gazeuse. De plus, les micro-organismes vivants qui se développent sur les façades sont détruits par les radicaux libres (issus de

la transformation du dioxygène et de l'eau par le dioxyde de titane);

– rôle antipollution : les polluants atmosphériques gazeux sont aussi en partie détruits par les nanoparticules de dioxyde de titane quand ces polluants viennent au contact de la surface. En particulier, le dioxyde d'azote est transformé en ion nitrate qui reste sur la surface et est entraîné par l'eau lorsqu'il pleut.

Le béton a ainsi un rôle à la fois d'auto-nettoyage et de dépolluant atmosphérique.

3 Rendement du puits à la roue (p. 187-188)

a. D'après le document 1, lors de l'évaluation du puits à la roue, on prend en compte tous les procédés de la chaîne énergétique : approvisionnement en énergie primaire, production, transport, stockage et distribution et utilisation du dihydrogène.

D'après le document 4, il faut donc tenir compte du rendement de la production de dihydrogène, du rendement de son transport, de sa compression et de son stockage, ainsi que du rendement de la PAC (pile à combustible). Selon les cas envisagés, il faut aussi tenir compte du rendement de la production de l'énergie électrique et du rendement du transport de l'énergie électrique.

Le rendement de la PAC doit être déterminé. Connaissant l'énergie fournie effectivement par la PAC au véhicule pour 100 km parcourus, soit 1,14 kg de dihydrogène consommés, il faut déterminer l'énergie totale libérée par la pile dans ces conditions.

La température optimale de fonctionnement des PAC mises en jeu étant inférieure à 100 °C, la pile fonctionne en produisant de l'eau liquide.

La quantité de dihydrogène contenue dans 1,14 kg de dihydrogène vaut :

$$n(\text{H}_2) = \frac{m}{M(\text{H}_2)} = \frac{1,14 \times 10^3}{2,0} = 5,7 \times 10^2 \text{ mol.}$$

L'énergie \mathcal{E}_t fournie par la pile vaut donc :

$$\mathcal{E}_t = \mathcal{E}(\text{eau liquide}) \cdot n(\text{H}_2) = 1,59 \times 10^8 \text{ J.}$$

Le rendement de la PAC sans reformeur s'en déduit :

$$\rho(\text{PAC}) = \frac{\mathcal{E}_{\text{upac}}}{\mathcal{E}_t} = \frac{87,8 \times 10^6}{(1,59 \times 10^8)} = 0,55; \text{ soit } 55 \text{ \%}.$$

Par définition du rendement, le rendement ρ de deux étapes successives 1 et 2, de rendements respectifs ρ_1 et ρ_2 , est égal à :

$$\rho = \frac{\mathcal{E}_{\text{utile}}(2)}{\mathcal{E}_{\text{reçue}}(1)} = \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{utile}}(1)}{\mathcal{E}_{\text{reçue}}(1)} \right) \cdot \left(\frac{\mathcal{E}_{\text{utile}}(2)}{\mathcal{E}_{\text{reçue}}(2)} \right)$$

car : $\mathcal{E}_{\text{reçue}}(2) = \mathcal{E}_{\text{utile}}(1)$

soit : $\rho = \rho_1 \cdot \rho_2$

Ce résultat se généralise à plusieurs étapes successives.

• Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit par électrolyse avec une électricité issue de l'énergie nucléaire :

$$\rho = \rho(\text{production } \mathcal{E}_{\text{nucléaire}}) \cdot \rho(\text{transport énergie}) \cdot \rho(\text{électrolyseur}) \cdot \rho(\text{distri, compr, stock H}_2) \cdot \rho(\text{PAC})$$

$$\text{soit : } \rho = 0,35 \times 0,93 \times 0,60 \times 0,75 \times 0,55 = 0,081, \text{ c'est-à-dire } 8,1 \text{ \%}.$$

• Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit par électrolyse avec une électricité issue du gaz naturel :

$$\rho = \rho(\text{production } \mathcal{E}_{\text{gaz naturel}}) \cdot \rho(\text{transport énergie}) \cdot \rho(\text{électrolyseur}) \cdot \rho(\text{distri, compr, stock H}_2) \cdot \rho(\text{PAC})$$

$$\text{soit : } \rho = 0,60 \times 0,93 \times 0,60 \times 0,75 \times 0,55 = 0,138, \text{ c'est-à-dire } 13,8 \text{ \%}.$$

• Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit par conversion du méthane :

$$\rho = \rho(\text{production H}_2) \cdot \rho(\text{distri, compr, stock H}_2) \cdot \rho(\text{PAC})$$

$$\text{soit : } \rho = 0,75 \times 0,75 \times 0,55 = 0,309, \text{ c'est-à-dire } 30,9 \text{ \%}.$$

• Pour un véhicule alimenté par une PAC dont le dihydrogène a été produit dans le véhicule à l'aide d'un reformeur à partir de méthanol, le rendement de la PAC n'étant plus que de 45 % ($\rho' = 0,45$), compte tenu du poids du reformeur embarqué :

$$\rho = \rho(\text{production H}_2 \text{ reformeur}) \cdot \rho'(\text{PAC})$$

$$\text{Soit : } \rho = 0,60 \times 0,45 = 0,27, \text{ c'est-à-dire } 27 \text{ \%}.$$

La filière ayant le meilleur rendement du puits à la roue est donc la filière véhicule PAC H₂ issu du gaz naturel.

b. Cette filière n'est pas celle qui correspond au meilleur bilan carbone. C'est la filière électrolyse de l'eau avec électricité nucléaire ou renouvelable qui possède le meilleur bilan carbone.

c. L'aspect financier n'est pas pris en compte dans cette analyse, il est pourtant très important pour le consommateur. Il faut tenir compte du coût de l'énergie, des matières premières et certainement, dans le futur du coût de la capture et du stockage du dioxyde de carbone émis du puits à la roue.

4 Le chant des cordes (p. 189-190)

Longueur de la tige

Dans la gamme tempérée, le La[#] se situe 10 demi-tons au-dessus du Do. Sa fréquence est donc égale à :

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{10} \cdot f_0$$

Pour l'harmonique de rang n , le texte du document 2 donne la relation entre la longueur L de la tige et la longueur d'onde λ du son produit :

$$L = \frac{n \cdot \lambda}{2}$$

Par ailleurs, en notant v la valeur de la vitesse des ondes dans la tige (célérité), la longueur d'onde du son est liée à sa fréquence par :

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

La longueur L de la tige s'exprime donc en fonction de la fréquence du son produit :

$$L = \frac{n \cdot v}{2f}$$

Cela s'écrit aussi : $L \cdot f = \frac{n \cdot v}{2}$

Pour le mode fondamental, on a $n = 1$, on a alors :

$$L \cdot f = \frac{v}{2}$$

Le texte du document 4 précise en outre que la célérité des ondes dans la tige est indépendante de leur fréquence, le produit $L \cdot f$ est donc constant pour les différentes notes.

Ainsi, on a $L_0 \cdot f_0 = L_1 \cdot f_1$; donc :

$$L_1 = \frac{L_0 \cdot f_0}{f_1} = \frac{L_0 \cdot f_0}{\frac{10}{2^{12}} f_0} = \frac{1,00}{\frac{10}{2^{12}}} = 0,561 \text{ m} = 56,1 \text{ cm.}$$

Protocole expérimental

- On coupe une tige d'aluminium de longueur $L_1 = 56,1$ cm de même section que la tige de longueur $L_0 = 1,00$ m.
- On fait vibrer cette tige à l'aide d'un archet.
- On enregistre le son produit avec un microphone relié à un système d'acquisition.
- On réalise l'analyse de Fourier du son obtenu. On doit obtenir un son pur dont la fréquence est $\left(\frac{1}{2}\right)^{10} \times 2093 = 3729$ Hz.

5 Halte aux bruits (p. 190-191)

1 Le document 2 permet de déterminer la masse surfacique du matériau utilisé. Au préalable, il faut déterminer le niveau d'intensité sonore L_A du son émis par le haut-parleur et reçu au point A du mur. Ainsi, on saura quelle atténuation le mur doit provoquer pour obtenir un calme total au point B ($L_B = 0$ dB).

Le point A est situé à 60° de l'axe principal du haut-parleur. D'après le document 1, pour $\theta = 60^\circ$, la perte de niveau d'intensité sonore est d'environ 6 dB par rapport à celui mesuré dans l'axe du haut-parleur ($\theta = 0^\circ$) à la même distance.

Le texte indique que, à 50 m dans l'axe du haut-parleur, le niveau d'intensité sonore est de 55 dB. On en déduit, puisque A se situe à 50 m du haut-parleur, que $L_A = 55 - 6 = 49$ dB.

Le mur doit donc provoquer une atténuation de 49 dB de ce son afin que l'on n'entende rien en B. D'après le document 2, sur la courbe correspondant à une fréquence de 500 Hz, on lit une masse surfacique d'environ $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

Ce mur doit être fabriqué dans un matériau dont la masse surfacique est d'au moins $250 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

2 Le document 3 présente différentes utilisations d'une salle en fonction de son volume et de la durée de réverbération, notamment celle de studio radio. On peut lire que, pour une salle de 600 m^3 de volume, la durée de réverbération doit être de 0,7 s environ si on veut en faire un studio radio. Or, la durée de réverbération de la salle étudiée est plus élevée ($TR = 1,5$ s). En l'état, elle ne peut donc servir de studio radio.

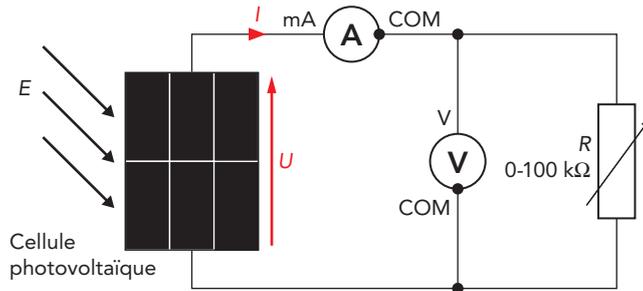
3 On peut proposer un aménagement à l'aide de la formule de Sabine (doc. 4). Il faut réduire la durée de réverbération de la salle dont le volume est fixé. La surface équivalente d'absorption, A , de la salle doit donc être augmentée, ce qui signifie, d'après l'expression de A , qu'il faut installer des panneaux absorbants sur les parois de la salle pour augmenter le facteur d'absorption (α_i) et, si besoin, augmenter leur surface, S_i , par rapport à celle des parois initiales.

TP Bac

6 Rendement d'une cellule photovoltaïque (p. 192-193)

D Travail à effectuer

1. Élaboration et réalisation d'un montage



2. Tracés des caractéristiques

Éclairement de la lampe de bureau : $E = 520 \text{ lux}$.

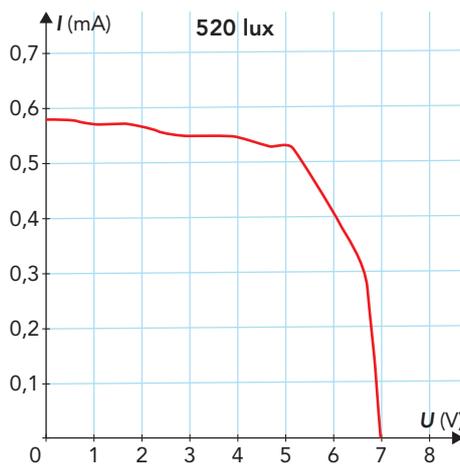
$I \text{ (mA)}$	0,58	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,53	0,52	0,33	0,23	0,17	0,00
$U \text{ (V)}$	0,00	1,13	2,26	2,78	3,86	4,35	4,79	5,27	6,58	6,79	6,87	7,05

On fait varier la valeur de la résistance R du potentiomètre entre 0 et 100 kΩ.

Pour $R = 0 \Omega$, la résistance est équivalente à un fil et la cellule est court-circuitée; l'intensité mesurée est alors l'intensité en court-circuit, soit ici $I_{CC} = 0,58 \text{ mA}$.

Pour $R = 100 \text{ k}\Omega$, la résistance est équivalente à un interrupteur ouvert; la tension mesurée est la tension en circuit ouvert, soit ici $U_{CO} = 7,05 \text{ V}$.

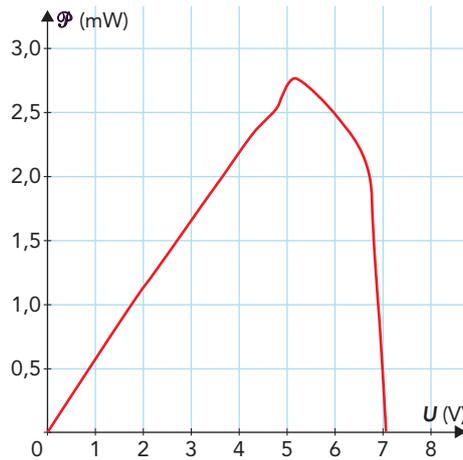
Caractéristique $I = f(U)$ tracée avec un tableur :



On fait calculer, par le tableur, la puissance électrique générée par la cellule photovoltaïque,

$\mathcal{P} = U \cdot I$, puis on trace la caractéristique $\mathcal{P} = f(U)$:

$I \text{ (mA)}$	0,58	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,53	0,52	0,33	0,23	0,17	0,00
$U \text{ (V)}$	0,00	1,13	2,26	2,78	3,86	4,35	4,79	5,27	6,58	6,79	6,87	7,05
$\mathcal{P} \text{ (mW)}$	0,00	0,64	1,27	1,53	2,12	2,35	2,54	2,74	2,17	1,56	1,17	0,00



3. Détermination du rendement de la cellule photovoltaïque

La puissance maximale générée par la cellule est $\mathcal{P}_{\max} = 2,74 \text{ mW} = 2,74 \times 10^{-3} \text{ W}$.

La cellule mesure 6,5 cm par 5,0 cm, donc sa surface est $S = 6,5 \times 10^{-2} \times 5,0 \times 10^{-2} = 3,25 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

On admet que 100 lux correspondent à $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, donc 520 lux = $5,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

Ainsi, $E \cdot S = 5,20 \times 3,25 \times 10^{-3} = 16,9 \times 10^{-3} \text{ W}$.

Le rendement de la cellule photovoltaïque étudiée est :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_m}{E \cdot S}, \quad \text{soit } \eta = \frac{2,74 \times 10^{-3}}{16,9 \times 10^{-3}} = 0,162 = 16,2 \%$$

4. Interprétation du résultat obtenu

Le rendement de la cellule étudiée est faible. Les cellules photovoltaïques au silicium convertissent assez mal l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Pour obtenir une puissance électrique plus élevée, il faut augmenter la surface S et donc associer plusieurs cellules photovoltaïques, comme c'est le cas pour les panneaux solaires.

Évaluation des incertitudes de mesure

En sciences expérimentales, il n'existe pas de mesures exactes : celles-ci sont toujours entachées d'erreurs plus ou moins importantes selon le protocole, la qualité des instruments de mesure ou le rôle de l'opérateur.

Évaluer l'incertitude sur une mesure est souvent un processus complexe, mais il s'agit d'une étape essentielle dans la détermination de la valeur mesurée.

Mesurer une grandeur, c'est rechercher une valeur de cette grandeur et lui associer une incertitude afin d'évaluer la qualité de la mesure.

Les termes de vocabulaire et les méthodes exposés ci-dessous sont ceux préconisés par l'AFNOR (Association française de normalisation), notamment dans la norme **NF ENV 13005 d'août 1999 Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure** [1]. Cette norme est issue d'un travail du Bureau international des poids et mesures (BIPM). Le document correspondant, intitulé *Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* [2], est disponible sur le site Internet du BIPM.

Un autre document du BIPM, intitulé *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)* [3] pourra aussi être consulté avec profit.

1 Mesures et erreurs de mesures

1.1 Définitions de base

- Le **mesurande** est la grandeur à mesurer ; c'est, par exemple, une masse, un volume, une durée, etc.
- Le **mesurage** est l'ensemble des opérations permettant de déterminer expérimentalement l'intervalle de valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à la grandeur mesurée. Le terme mesurage est préféré à celui de mesure, car le mot « mesure » a de nombreux sens dans la langue française.
- La **valeur mesurée**, ou résultat d'un mesurage, est la valeur attribuée à un mesurande suite à un mesurage.
- La **valeur vraie** d'un mesurande est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage était parfait. Un mesurage n'étant jamais parfait, cette valeur est toujours inconnue.
- L'**erreur de mesure** est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie. Par définition, cette erreur est inconnue puisque la valeur vraie est inconnue.

Une liste plus complète de termes de vocabulaire est présentée à la fin de ce document.

1.2 Erreurs de mesure

► Deux types d'erreurs

Les erreurs de mesures peuvent être dues à l'instrument de mesure, à l'opérateur ou à la variabilité de la grandeur mesurée. On distingue deux types d'erreurs de mesures.

• L'erreur de mesure aléatoire

Lorsqu'un même opérateur répète plusieurs fois, dans les mêmes conditions, le mesurage d'un même mesurande, les valeurs mesurées peuvent être différentes. On parle alors d'**erreur de mesure aléatoire**. Cette dispersion des valeurs mesurées est due à la qualité du mesurage réalisé par l'opérateur et/ou à la qualité de l'instrument de mesure.

Si on effectue, dans les mêmes conditions, un nombre infini de mesurages, le meilleur estimateur de la valeur du mesurande est la moyenne \bar{m} de toutes les valeurs mesurées.

Une valeur mesurée m est en général différente de \bar{m} . L'erreur aléatoire est alors la différence $E_{Ra} = m - \bar{m}$. En pratique, on ne peut faire qu'un nombre fini de mesurages. Par conséquent, il est uniquement possible de déterminer une estimation de l'erreur aléatoire.

• L'erreur de mesure systématique

Un appareil défectueux, mal étalonné ou utilisé incorrectement conduit à des valeurs mesurées proches les unes des autres, mais éloignées de la valeur vraie. On parle alors d'**erreur de mesure systématique**.

Si la valeur vraie est m_{vrai} , l'erreur systématique est $E_{Rs} = \bar{m} - m_{vrai}$. Par définition, m_{vrai} est inconnue. De plus, il est impossible de faire un nombre infini de mesurages pour déterminer correctement \bar{m} . Par conséquent, il est uniquement possible de déterminer une estimation de l'erreur systématique.

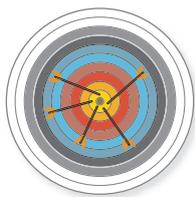
► Détermination de l'erreur de mesure

Lors d'un mesurage donnant la valeur mesurée m , l'**erreur de mesure** est :

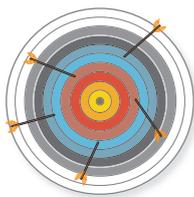
$$E_R = m - m_{vrai} = m - \bar{m} + \bar{m} - m_{vrai} = E_{Ra} + E_{Rs}$$

La détermination de l'erreur de mesure nécessite de prendre en compte les deux composantes précédentes. Celles-ci peuvent être plus ou moins importantes.

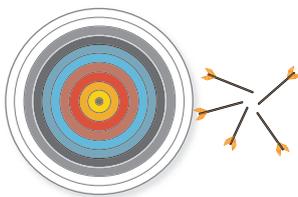
Par exemple, si la valeur vraie est au centre de la cible et si les flèches représentent des valeurs mesurées :



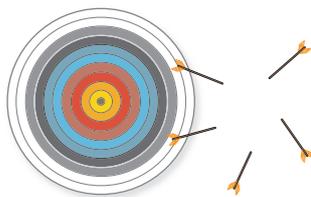
Tous les impacts sont proches du centre de la cible : les erreurs aléatoires et systématiques sont faibles.



Les impacts sont éloignés du centre de la cible, mais centrés, en moyenne, sur le centre de la cible : les erreurs aléatoires sont importantes, mais les erreurs systématiques sont faibles.



Les impacts sont groupés, mais loin du centre : les erreurs aléatoires sont faibles, mais les erreurs systématiques sont importantes.



Les impacts sont étalés et loin du centre : les erreurs aléatoires et systématiques sont importantes.

2 Incertitude de mesure

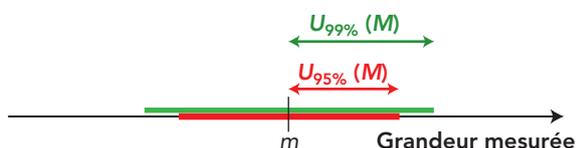
• L'**incertitude de mesure**, ou incertitude du résultat d'un mesurage, est la valeur, associée au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande. L'incertitude de mesure est donc une **estimation de l'erreur de mesure**.

Conformément à la norme NF ENV 13005, l'**incertitude de mesure est notée U** . La notation U vient de l'anglais « *uncertainty* ».

L'ancienne notation Δ pour l'incertitude ne correspond pas aux normes internationales actuelles.

• L'**intervalle de confiance** est un intervalle dans lequel la valeur vraie a de grandes chances de se trouver. Cet intervalle est centré sur la valeur mesurée, notée m .

En général, la largeur de cet intervalle est choisie pour avoir 95 % ou 99 % de chance de trouver la valeur vraie à l'intérieur. Pour un même mesurage, le second intervalle (correspondant à un niveau de confiance de 99 %, en vert sur le schéma ci-dessous) sera plus large que le premier (correspondant à un niveau de confiance de 95 %, en rouge sur le schéma ci-dessous).



La qualité de la mesure est d'autant meilleure que l'incertitude associée est petite et donc que l'intervalle de confiance est étroit.

Remarque : la notion d'intervalle de confiance est vue en mathématiques en classe de Seconde.

• Suivant la méthode utilisée pour effectuer le calcul d'une incertitude de mesure, on peut classer cette incertitude dans l'un des deux types ci-dessous :

– Une **incertitude de type A** est évaluée par des méthodes statistiques qui mettent en jeu la **moyenne** et l'**écart-type**. Elle est issue de l'exploitation d'un nombre important de valeurs mesurées.

– Une **incertitude de type B** est évaluée par d'autres méthodes. Elle correspond en général à une mesure unique. Sa détermination n'est pas simple, car il faut prendre en compte toutes les sources d'erreurs ou, au préalable, avoir identifié les sources d'erreurs les plus importantes.

• L'**incertitude-type** est une incertitude de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type. L'**incertitude-type est notée u** .

• Lorsque les sources d'incertitudes sont multiples, on estime l'incertitude-type pour chacune d'entre elles, puis on calcule une **incertitude-type composée** qui peut prendre en compte des évaluations de type A et de type B.

3 Évaluation d'une incertitude de type A (incertitude de répétabilité)

3.1 Incertitude-type

Lorsqu'un même manipulateur réalise plusieurs fois le mesurage d'un même mesurande M , dans les mêmes conditions expérimentales, il peut trouver des résultats fluctuants. Il en est de même pour des manipulateurs différents réalisant simultanément la même mesure avec du matériel similaire. Dans ce cas, on utilise des notions de statistiques (moyenne et écart-type) pour analyser les résultats.

Pour une série de n mesures indépendantes donnant des valeurs mesurées m_k :

– la valeur retenue comme **valeur mesurée** est la **moyenne \bar{m}** de toutes les valeurs mesurées :

$$\bar{m} = \frac{\sum_{k=1}^n m_k}{n}$$

– l'**écart-type expérimental σ_{n-1}** de la série de mesures est :

$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (m_k - \bar{m})^2}{n-1}}$$

Cet écart-type permet d'évaluer l'**incertitude-type $u(M)$** :

$$u(M) = \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

Plus le nombre n de mesures indépendantes est grand, plus l'incertitude-type est petite.

3.2 Incertitude élargie

- Dans la pratique, on ne peut réaliser qu'un nombre limité de mesurages. Pour prendre en compte ce nombre limité, on multiplie l'incertitude-type par un facteur k appelé **facteur d'élargissement**. On définit ainsi une **incertitude élargie**, appelée **incertitude de répétabilité** et notée U .

L'incertitude de répétabilité est donc :

$$U(M) = k \cdot u(M) = k \cdot \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$

- Dans l'hypothèse où toute erreur systématique a été écartée et où les diverses valeurs mesurées sont

réparties selon une loi gaussienne, le coefficient d'élargissement k , associé à un niveau de confiance donné et au nombre n de mesures, est donné par la loi de Student. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de k pour des niveaux de confiance de 95 % et 99 % et pour des nombres n de mesurages courants.

Ce tableau montre que :

- pour un même nombre n de mesures, plus le niveau de confiance est grand et plus k est grand ;
- pour un même niveau de confiance, plus le nombre n de mesures indépendantes est grand et plus k est petit.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
$k_{95\%}$	12,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,26	2,20	2,16	2,13	2,11	2,09
$k_{99\%}$	63,7	9,93	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25	3,11	3,01	2,95	2,90	2,86

4 Évaluation d'une incertitude de type B (incertitude sur une mesure unique)

4.1 Incertitude-type et incertitude élargie

L'évaluation d'une incertitude de type B nécessite de rechercher les sources d'erreur et d'évaluer l'incertitude associée à chaque source. La précision de l'appareil de mesure, la façon dont il est utilisé et la qualité du mesurage sont à prendre en compte dans la détermination de cette incertitude.

Des considérations statistiques sur la répartition de l'erreur de mesure conduisent à l'obtention d'une incertitude-type u pour les situations les plus courantes.

Pour les incertitudes de type B, la norme considère que l'incertitude de mesure à prendre en compte est l'incertitude élargie $U = k \cdot u$. Pour un niveau de confiance de 95 %, elle est obtenue avec un facteur d'élargissement $k = 2$; celle pour 99 % est obtenue avec $k = 3$.

Dans les situations présentées ci-dessous, l'incertitude élargie est indiquée pour un niveau de confiance de 95 % ($k = 2$).

4.2 Exemple pour la lecture sur une échelle graduée

Lorsque la mesure est obtenue par lecture sur une échelle ou un cadran, une étude statistique de la répartition des valeurs possibles entre les graduations qui encadrent la valeur lue permet d'estimer que l'incertitude-type de lecture est :

$$u_{\text{lecture}} = \frac{1 \text{ graduation}}{\sqrt{12}}$$

L'incertitude élargie, pour un niveau de confiance de 95 %, est donc :

$$U_{\text{lecture}} = 2 \times \frac{1 \text{ graduation}}{\sqrt{12}}$$

Par exemple, avec un thermomètre gradué en degré Celsius, l'incertitude de lecture sur une température T est :

$$U_{\text{lecture}}(T) = 2 \times \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,58 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

4.3 Exemple pour une double lecture

Lorsque la mesure nécessite une double lecture, les erreurs de lecture peuvent se cumuler ; elles peuvent aussi se compenser, totalement ou partiellement. Pour une double lecture, on a :

$$u_{\text{double lecture}} = \sqrt{2(u_{\text{lecture}})^2} = \sqrt{2} u_{\text{lecture}}$$

Pour un niveau de confiance de 95 %, l'incertitude à prendre en compte est alors :

$$U_{\text{double lecture}} = 2 \times \sqrt{2} u_{\text{lecture}} = \sqrt{2} U_{\text{lecture}}$$

$$U_{\text{double lecture}} = \sqrt{2} \times 2 \times \frac{1 \text{ graduation}}{\sqrt{12}}$$

Par exemple, avec une règle graduée en millimètres, l'incertitude de lecture sur une distance d est :

$$U_{\text{double lecture}}(d) = \sqrt{2} \times 2 \times \frac{1}{\sqrt{12}} = 0,8 \text{ mm}.$$

En pratique, cette incertitude est souvent arrondie à 1 mm.

Un autre exemple peut être donné pour une lecture sur un oscilloscope.

Deux lectures sont nécessaires pour déterminer la valeur de la période d'une tension. Chaque lecture est réalisée sur une échelle graduée en cinquième de division. L'incertitude liée à la double lecture est :

$$U_{\text{double lecture}} = \sqrt{2} \times 2 \times \frac{0,2}{\sqrt{12}} = 0,163 \text{ DIV}.$$

Si la base de temps est réglée sur 5 ms/DIV, l'incertitude de lecture sur la valeur mesurée de la période est :

$$U_{\text{double lecture}}(T) = 5 \times 0,163 = 0,82 \text{ ms}.$$

En pratique, cette incertitude est souvent arrondie à 1 ms.

4.4 Exemple pour l'utilisation d'un appareil de tolérance donnée

Lorsque la mesure est obtenue avec un appareil pour lequel le constructeur indique la tolérance t (notée $\pm t$), une étude statistique de la répartition des valeurs possibles autour de la valeur lue permet d'estimer que l'incertitude-type liée à la tolérance de cet appareil est :

$$u_{\text{tolérance}} = \frac{t}{\sqrt{3}}$$

Pour un niveau de confiance de 95 %, l'incertitude à prendre en compte est alors :

$$U_{\text{tolérance}} = 2 \times \frac{t}{\sqrt{3}}$$

Par exemple, avec une fiole jaugée de tolérance $\pm 0,05$ mL, l'incertitude sur le volume V liée à l'instrument est :

$$U_{\text{tolérance}}(V) = 2 \times \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,058 \text{ mL.}$$

4.5 Exemple pour l'utilisation d'un appareil numérique

Lorsque la mesure est obtenue par lecture d'un appareil à affichage numérique, l'incertitude à prendre en compte ne dépend que des caractéristiques de l'appareil. Généralement la notice indique la « précision » p de l'appareil, le plus souvent par un pourcentage de la valeur lue sur l'écran et par un certain nombre de digit.

L'incertitude-type liée à la précision de cet appareil est :

$$u_{\text{précision}} = \frac{p}{\sqrt{3}}$$

Pour un niveau de confiance de 95 %, l'incertitude à prendre en compte est alors :

$$U_{\text{précision}} = 2 \times \frac{p}{\sqrt{3}}$$

Par exemple, avec un ampèremètre affichant 1,62 mA et dont la notice indique pour l'incertitude (3 % de la valeur lue + 1 digit), l'incertitude sur l'intensité I est :

$$U(I) = 2 \times \frac{3}{100} \times 1,62 + 0,01 = 0,12 \text{ mA.}$$

5 Incertitudes composées

Dans certains cas complexes, il faut souvent combiner les méthodes de type A et de type B pour obtenir une meilleure évaluation de l'incertitude. On a alors, pour une grandeur G (mesurande) :

$$U(G) = \sqrt{(U_A(G))^2 + (U_B(G))^2}$$

6 Propagation des incertitudes

Lorsqu'une grandeur G se déduit d'autres grandeurs par un calcul, l'incertitude sur G se déduit des incertitudes sur les autres grandeurs.

6.1 Cas d'une somme ou d'une différence

Une grandeur G peut être la somme ou la différence de deux autres grandeurs **indépendantes** G_1 et G_2 . On a alors $G = G_1 + G_2$ ou $G = G_1 - G_2$.

Dans ces deux cas, l'incertitude $U(G)$ est donnée par :

$$U(G) = \sqrt{(U(G_1))^2 + (U(G_2))^2}$$

On parle parfois de somme quadratique des incertitudes pour ce type de calcul.

6.2 Cas d'un produit ou d'un quotient

Une grandeur G peut être le produit ou le quotient de deux autres grandeurs **indépendantes** G_1 et G_2 .

On a alors $G = G_1 \times G_2$ ou $G = \frac{G_1}{G_2}$.

Dans ces deux cas, l'incertitude $U(G)$ est donnée par :

$$U(G) = G \sqrt{\left(\frac{U(G_1)}{G_1}\right)^2 + \left(\frac{U(G_2)}{G_2}\right)^2}$$

Cela revient à écrire :

$$\frac{U(G)}{G} = \sqrt{\left(\frac{U(G_1)}{G_1}\right)^2 + \left(\frac{U(G_2)}{G_2}\right)^2}$$

On parle parfois de somme quadratique des incertitudes relatives pour ce type de calcul.

6.3 Cas d'une multiplication par un nombre exact

Une grandeur G peut être obtenue à partir d'une grandeur G_1 multipliée par un nombre exact A . On a alors $G = A \times G_1$.

Dans ce cas, l'incertitude $U(G)$ est donnée par :

$$U(G) = A \times U(G_1)$$

Remarque importante : ce résultat n'est pas le même que celui obtenu pour une somme, car, dans ce cas, les grandeurs ne sont pas indépendantes.

Par exemple, si $G = 2 \times G_1$, alors l'expression correcte de $U(G)$ est donnée par la formule relative à une multiplication par un nombre exact :

$$U(G) = 2 U(G_1)$$

En considérant G comme la somme $G_1 + G_1$ de grandeurs indépendantes, on arriverait à une incertitude $U(G) = \sqrt{(U(G_1))^2 + (U(G_1))^2} = \sqrt{2} U(G_1)$; cette expression n'est pas correcte, car la somme effectuée n'est pas une somme de grandeurs indépendantes.

6.4 Cas d'une puissance

Une grandeur G peut être obtenue à partir d'une autre grandeur élevée à une puissance n . On a alors :

$$G = G_1^n$$

Dans ce cas, l'incertitude $U(G)$ est donnée par :

$$U(G) = n \cdot G \cdot \frac{U(G_1)}{G_1} = n \cdot G_1^{n-1} \cdot U(G_1)$$

Remarque importante : ce résultat n'est pas le même que celui obtenu pour une multiplication, car, dans ce cas, les grandeurs ne sont pas indépendantes.

Par exemple, si $G = G_1 \times G_1 = G_1^2$, alors l'expression correcte de $U(G)$ est donnée par la formule relative à une puissance (avec ici $n = 2$) : $U(G) = 2 G_1 \cdot U(G_1)$.

En considérant G comme le produit $G_1 \times G_1$ de grandeurs indépendantes, on arriverait à une incertitude :

$$U(G) = G \cdot \sqrt{\left(\frac{U(G_1)}{G_1}\right)^2 + \left(\frac{U(G_1)}{G_1}\right)^2} = \sqrt{2} G_1 \cdot U(G_1)$$

Cette expression n'est pas correcte, car le produit effectué n'est pas un produit de grandeurs indépendantes.

6.5 Cas général

Si une grandeur G est une fonction de grandeurs G_1 , G_2 , etc. **indépendantes les unes des autres**, alors l'incertitude sur G se déduit des incertitudes sur G_1 , G_2 , etc. en utilisant l'expression ci-dessous qui fait intervenir les dérivées partielles de G par rapport à G_1 , G_2 , etc. :

$$U(G) = G \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial G_1} U(G_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial G_2} U(G_2)\right)^2 + \dots}$$

6.6 Remarque sur l'usage des sommes quadratiques

Les « anciens » calculs d'incertitudes conduisaient à une somme des incertitudes ou des incertitudes relatives. Cette technique correspondait à une majoration excessive des incertitudes.

En effet, pour l'incertitude sur une somme, on calculait la somme des incertitudes.

Par exemple, si $G = G_1 + G_2$ ou $G = G_1 - G_2$, avec les notations anciennes, on avait alors :

$$\Delta(G) = \Delta(G_1) + \Delta(G_2)$$

De même, pour l'incertitude sur un produit, on calculait la somme des incertitudes relatives.

Par exemple, si $G = G_1 \times G_2$ ou $G = \frac{G_1}{G_2}$, avec les notations anciennes, on avait :

$$\frac{\Delta(G)}{G} = \frac{\Delta(G_1)}{G_1} + \frac{\Delta(G_2)}{G_2}$$

Ces calculs correspondent aux cas où les incertitudes sur chacune des grandeurs se cumulent. Cela est très peu probable. En effet, si les mesurages de ces grandeurs sont **indépendants**, et si les erreurs de mesure sont **aléatoires**, il existe 50 % de chance pour que les incertitudes tendent à se compenser.

Des considérations statistiques sur la répartition des incertitudes de mesures conduisent alors aux sommes quadratiques présentées dans les paragraphes 6.1 à 6.5 ci-dessus pour évaluer l'incertitude de mesure.

Les « anciens » calculs ne sont utilisés que **si l'on suspecte une dépendance entre les mesures** qui empêcherait l'utilisation d'une somme quadratique. Ces situations correspondent aux remarques des paragraphes 6.3 ($G = G_1 + G_1$ et $U(G) = 2 U(G_1)$) et 6.4 ($G = G_1 \times G_1$ et $U(G) = 2 G_1 \times U(G_1)$).

7 Arrondissement et écriture d'un résultat

Le résultat du mesurage d'un mesurande M est un intervalle de confiance associé à un niveau de confiance. L'intervalle de confiance est centré sur la valeur m (valeur mesurée lors d'une mesure unique ou valeur moyenne des mesures lors d'une série de mesures) et a pour demi-largeur l'incertitude de mesure $U(M)$.

Le résultat du mesurage s'écrit $M = m \pm U(M)$ ou $M \in [m - U(M) ; m + U(M)]$. Si elle existe, l'unité est précisée.

Par convention, l'incertitude est arrondie à la valeur supérieure avec au plus deux chiffres significatifs, et les derniers chiffres significatifs conservés pour la valeur mesurée m sont ceux sur lesquels porte l'incertitude $U(M)$.

Ainsi, le dernier chiffre significatif de la valeur mesurée doit être à la même position décimale que le dernier chiffre significatif de l'incertitude (voir tableau ci-dessous).

Dans le résultat de la forme $M = m \pm U(M)$	
Pour la valeur mesurée m , on garde :	Pour l'incertitude U , on garde :
<ul style="list-style-type: none"> - les chiffres « exacts » (ceux sans incertitude); - le 1^{er} chiffre entaché d'erreur; - le 2^e chiffre entaché d'erreur que l'on arrondit. 	<ul style="list-style-type: none"> - le 1^{er} chiffre non nul; - le chiffre suivant majoré.

Quelques exemples :

	Valeur mesurée m	Incertaince $U(M)$	Résultat du mesurage M
Vitesse d'une moto	57,925 m · s ⁻¹	0,088 m · s ⁻¹	$V = (57,925 \pm 0,088) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Charge électrique	$1,6042 \times 10^{-19} \text{ C}$	$0,0523 \times 10^{-19} \text{ C}$	$q = (1,604 \pm 0,053) \times 10^{-19} \text{ C}$
Concentration	0,1412 mol · L ⁻¹	$1,64 \times 10^{-2} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$	$C = (0,141 \pm 0,017) \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

Lorsqu'une grandeur doit être utilisée pour un calcul ultérieur, on conserve au moins un chiffre significatif de plus dans son expression.

Remarque sur la majoration de l'incertitude

Le dernier chiffre significatif de l'incertitude doit normalement être arrondi en le majorant. La norme NF ENV 13005 précise cependant que « le bon sens doit prévaloir et une valeur comme $u(x) = 28,05 \text{ kHz}$ doit être arrondie à la valeur inférieure, 28 kHz. »

Remarque sur le nombre de chiffres significatifs de l'incertitude

La norme NF ENV 13005 précise qu'une incertitude ne doit « pas être donnée avec un nombre excessif de chiffres. Il suffit habituellement de fournir [...] au plus deux chiffres significatifs [...] ».

Dans la littérature [4], on trouve aussi : « Les incertitudes expérimentales doivent presque toujours être arrondies avec un seul chiffre significatif. » Le

« presque toujours » s'explique par la trop grande surestimation qui serait introduite dans certains cas si on ne gardait qu'un seul chiffre significatif.

Ainsi, si une incertitude est de 0,14, l'arrondir à 0,1 réduirait trop fortement la largeur de l'intervalle de confiance. L'arrondir, en la majorant, à 0,2 diminuerait excessivement la précision du mesurage. Ce constat peut être fait si le 1^{er} chiffre significatif est un 1, un 2 ou, dans une moindre mesure, un 3. Dans ces cas, il faut garder deux chiffres significatifs dans l'incertitude. Dans les autres cas, on peut ne garder qu'un chiffre significatif.

En suivant cette règle pour le tableau précédent, on aurait alors :

Résultat du mesurage M
$V = (57,93 \pm 0,09) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
$q = (1,60 \pm 0,06) \times 10^{-19} \text{ C}$
$C = (0,141 \pm 0,017) \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$

ANNEXE : Vocabulaire

- Le **mesurande** est la grandeur à mesurer ; c'est, par exemple, une masse, un volume, une durée, etc.
- Le **mesurage** est l'ensemble des opérations permettant de déterminer expérimentalement l'intervalle de valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à la grandeur mesurée. Le terme mesurage est préféré à celui de mesure, car le mot « mesure » a de nombreux sens dans la langue française.
- La **valeur mesurée**, ou résultat d'un mesurage, est la valeur attribuée à un mesurande suite à un mesurage.
- La **valeur vraie** d'un mesurande est la valeur que l'on obtiendrait si le mesurage était parfait. Un mesurage n'étant jamais parfait, cette valeur est toujours inconnue.
- L'**erreur de mesure** est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur vraie. Par définition, cette erreur est inconnue puisque la valeur vraie est inconnue.

- L'**incertitude de mesure**, ou incertitude du résultat d'un mesurage, est la valeur, associée au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

- L'**erreur systématique** est la composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible.

- L'**erreur aléatoire** est la composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, varie de façon imprévisible.

- L'**incertitude-type** est l'incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart-type.

- L'**incertitude-type composée** est l'incertitude-type du résultat d'un mesurage obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs.

- L'**incertitude élargie** est la valeur, associée au résultat d'un mesurage, qui définit un intervalle autour du résultat d'un mesurage à l'intérieur duquel on peut s'attendre à trouver une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande. Cet intervalle est appelé **intervalle de confiance**, il est associé à un niveau de confiance.

- Le **niveau de confiance** est la probabilité de trouver la valeur vraie à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

- Le **facteur d'élargissement** est le facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude-type composée pour obtenir l'incertitude élargie.

- L'**exactitude de mesure** est l'étroitesse de l'accord entre la valeur mesurée et la valeur vraie.

- La **justesse de mesure** est l'étroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de valeurs mesurées répétées et la valeur vraie.

- La **fidélité de mesure** est l'étroitesse de l'accord entre les valeurs mesurées obtenues par des mesurages répétés.

Références bibliographiques

[1] AFNOR, *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, NF ENV 13005, Paris : AFNOR, août 1999.

[2] BIPM, *Évaluation des données de mesure – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, JCGM 100 : 2008, Paris : BIPM, 2008.

http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_F.pdf

[3] BIPM, *Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)*, 3^e édition, JCGM 200 : 2012, Paris : BIPM, 2012.

http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf

[4] J. TAYLOR, *Incertainces et analyse des erreurs dans les mesures physiques*, Paris : Dunod, 2000 (pour la traduction française).

[5] DEGSCO, *Mesures et incertitudes*, MEN/DEGSCO, mai 2012.

http://media.eduscol.education.fr/file/Mathematiques/07/0/LyceegT_ressources_MathPC_Mesure_et_incertainces_eduscol_214070.pdf

[6] R. MOREAU, « Mesures, erreurs et incertitudes en physique-chimie », in *Actes de l'université d'été de juillet 2011*, Cachan, 2011.

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

[7] B. N. TAYLOR, C. E. KUYATT, *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, NIST Technical Note 1297, Gaithersburg, 1994.

<http://www.nist.gov/pml/pubs/tn1297/index.cfm>