



Le document d'accompagnement ci-dessous a pour but d'aider les professeurs qui enseignent la physique-chimie au collège et de les guider pour la mise en application des récents programmes.

Il ne s'agit pas, bien entendu, d'un manuel. En particulier, le document ne prétend pas aborder la totalité des activités évoquées par le programme. Le choix des activités illustrées par les diverses fiches a été guidé par le souci d'éclairer les professeurs lorsque le groupe de travail disciplinaire a estimé qu'il pouvait être particulièrement opportun d'apporter une information : **l'importance relative dans le document d'accompagnement des différentes rubriques n'est pas en rapport direct avec le temps qu'il convient de leur consacrer.**

Rappelons que le programme propose dans la colonne « exemples d'activités » une liste **non obligatoire et non exhaustive** d'exemples qui peuvent être exploités en expériences de cours, en travaux pratiques ou en travaux de documentation.

Conformément à cette indication, le document ci-dessous illustre soit des activités mentionnées explicitement par le programme, soit d'autres en complément. Le choix de telle ou telle activité n'est jamais une obligation, la liberté pédagogique du professeur est à cet égard entière. Il

convient seulement de traiter les champs de connaissance mentionnés dans la colonne du programme intitulée « contenus-notions » et de construire le socle minimal défini par la colonne « compétences ».

Le document est constitué de deux parties : des considérations générales et une partie thématique.

La partie thématique est constituée de « fiches » repérées par des lettres :

- C : Complément scientifique ;
- D : Document pédagogique ;
- E : Fiche Expérimentale ;
- H : Fiche Historique ;
- T : Fiche Transdisciplinaire.

La typologie ci-dessus n'a rien d'absolu et n'a été introduite que pour la commodité des lecteurs.

Une fiche D décrit des séquences d'activités et contiennent des suggestions pédagogiques, certaines des informations écrites ou graphiques qu'elle contient peuvent être soumises directement aux élèves. En revanche, une fiche C est destinée à l'information des professeurs.

Les documents et fiches présentés ci-après ont été classés dans l'ordre dans lequel les diverses activités sont mentionnées dans le programme de 3^e.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

A. Pratique des activités documentaires

Dans toutes les activités professionnelles touchant à la physique-chimie, il est d'autant plus nécessaire d'être capable de se documenter que les savoirs sont très évolutifs. Les professeurs, par exemple, se tiennent informés des nouveautés scientifiques et pédagogiques en consultant des revues de vulgarisation et des publications professionnelles spécialisées. Les techniciens et ingénieurs se documentent constamment sur les nouveaux appareillages et procédés ;

ils pratiquent la « veille technologique ». Les chercheurs lisent en permanence les publications des grandes revues scientifiques.

Une initiation aux méthodes de la documentation est nécessaire dès le collège : cerner le sujet, faire une recherche méthodique dans les documents, reformuler en termes simples les connaissances extraites, les organiser en vue de faire un compte rendu.

Le lieu privilégié de ce travail est le CDI. Souvent, il est nécessaire d'enrichir le fonds documentaire avant de procéder au



travail avec les élèves, afin de disposer de données actualisées (thème des matériaux par exemple). De nouveaux outils sont apparus : encyclopédies multimédias, réseaux.

En ce qui concerne internet, son emploi « en ligne » n'est pas la seule modalité envisageable. Le professeur peut souvent faire travailler les élèves « hors ligne » à partir de bases données téléchargées par lui au préalable. Ce procédé peut permettre, outre les économies réalisées, de gagner du temps en focalisant la recherche sur des données pertinentes. La rubrique physique-chimie du serveur institutionnel d'adresse : www.education.gouv.fr/sec/phy/phchnte.htm conduit, entre autre services, à des listes d'adresses intéressant l'enseignement de la physique-chimie à divers niveaux, notamment au collège.

On trouvera dans les textes qui suivent différents documents (matériaux, environnement, histoire des sciences...) pouvant être utilisés avec les classes.

B. Histoire des sciences et des techniques, histoire et géographie

Du point de vue des professeurs

Une connaissance minimale de l'histoire des sciences et des techniques permet au professeur de physique-chimie d'avoir bien à l'esprit :

- le caractère évolutif des connaissances : il a souvent fallu beaucoup de temps pour que les hommes parviennent à dégager les concepts qui nous sont aujourd'hui familiers (existence des atomes pour ne prendre qu'un seul exemple) ; quant aux créations techniques, sauf exception, elles ne naissent pas non plus de rien mais sont au contraire le produit de l'évolution ou de la synthèse de découvertes antérieures ;

- le lien étroit entre sciences et techniques : en physique et en chimie, la validation des concepts théoriques n'est pas indépendante de l'appareillage expérimental, donc des perfectionnements technologiques (techniques du vide et découverte de l'électron par exemple, ou encore accélérateurs et physique des particules élémentaires) ; réciproquement, les avancées techniques s'appuient souvent sur les progrès théoriques (microscope à effet tunnel par exemple) ;

- la relation entre les sciences et techniques et le contexte socioculturel : cultes religieux et astronomie par exemple, ou encore civilisation des loisirs et technologies audiovisuelles, visées expansionnistes et développement industriel, modèle de la réussite sociale individuelle et tradition de l'invention et du brevet, etc.

Par ailleurs, le professeur retrouvera bien souvent, en étudiant les concepts anciens (sur la propagation de la lumière, exemple parmi tant d'autres), certaines représentations intuitives fausses des élèves. Bien les connaître lui permettra de mieux les corriger.

Du point de vue des élèves

Les élèves de collège se montrent généralement très intéressés par l'histoire des sciences et des techniques, à condition cependant d'aborder le sujet par des voies qui leur

soient accessibles. Il peut s'agir par exemple de l'étude :

- de la vie d'un grand inventeur (Franklin, Edison, etc.) ;
- de l'évolution d'un objet particulier (lampe à incandescence, générateur électrique, etc.) ;
- de l'évolution d'une technique (recyclage des matériaux par exemple).

Des textes tout faits peuvent être trouvés dans divers manuels, mais le professeur peut également avoir plaisir à les composer lui-même. Il faut évidemment que ces textes :

- évitent tout terme inutilement compliqué ;
- n'hésitent pas à mettre en avant les aspects anecdotiques (la « petite histoire ») ;
- fassent le lien entre l'inventeur ou la découverte et le contexte géographique, historique, culturel et social.

C'est sur ce dernier point qu'un travail interdisciplinaire très intéressant peut être conduit avec les professeurs d'histoire-géographie. Il convient de rappeler ici¹ les programmes d'histoire du collège :

- classe de 6^e : le monde antique ;
 - classe de 5^e : le Moyen Âge et la naissance des Temps modernes ;
 - classe de 4^e : des Temps modernes à la naissance du monde contemporain² ;
 - classe de 3^e : le monde de 1914 à nos jours ;
- et ceux de géographie :

- classe de 6^e : cartes et paysages du monde ;
- classe de 5^e : l'Afrique, l'Asie et l'Amérique ;
- classe de 4^e : l'Europe et la France ;
- classe de 3^e : l'organisation géographique du monde.

Pour la classe de 3^e, deux thèmes sont susceptibles de faire le lien entre histoire-géographie et physique-chimie :

- lien entre le développement des sociétés et l'augmentation des puissances mises à la disposition de l'homme (inférieure à la centaine de watts pour les efforts musculaires prolongés de l'homme, de l'ordre du kilowatt pour l'animal de trait, et plus pour un moulin à eau et à vent) ;
- manipulation des unités appropriées et des ordres de grandeur à propos des ressources énergétiques (TEP et joule).

Ce travail interdisciplinaire peut revêtir différents aspects : élaboration en commun d'un texte relatif à l'histoire des sciences et techniques, étude de ce texte par les élèves en parallèle dans les deux disciplines, etc. Toute forme de ce travail en commun ne pourra qu'être bénéfique. On trouvera dans les documents qui suivent, comme par exemple celui intitulé « La production industrielle d'électricité : historique » ou encore « L'alimentation électrique des trains et métros : historique », des propositions d'activités.

1. Il est important que le professeur de physique-chimie consulte et connaisse, au moins dans les grandes lignes, les programmes officiels et commentaires des autres disciplines (et réciproquement).

2. Soit du XVII^e siècle à 1914. On notera particulièrement l'alinéa III.1. : « L'âge industriel ("À partir des transformations des techniques de production de la fin du XVIII^e siècle à l'aube du XX^e siècle, l'étude dégage les traits majeurs du phénomène industriel et de ses effets géographiques et sociaux...") ».



Étude de textes scientifiques et français

Le programme de français de la classe de 3^e traite explicitement de l'étude de textes documentaires, en particulier scientifiques (rubrique I B 2 c - Textes documentaires) : « On conduit l'élève à une plus grande autonomie dans le choix et le maniement des documents. On poursuit la pratique des dictionnaires usuels et des ouvrages de référence. On initie les élèves à l'utilisation des manuels d'histoire littéraire ou à des ouvrages de vulgarisation scientifique. On apprend à consulter et on utilise dans toute la mesure du possible les banques de données informatiques et télématiques. Dans l'étude de la presse, on distingue l'information du commentaire et on dégage les spécificités du discours journalistique, notamment en comparant le traitement d'un même sujet dans plusieurs journaux. »

La voie d'un travail interdisciplinaire est ici toute tracée.

C. Mesures et incertitudes³

Introduction

Au collège, dès la classe de 4^e, le programme, par son volet électricité, permet aux élèves de manipuler ampèremètres et voltmètres ; on mesure des températures pour repérer les changements d'états, on met en évidence la variation de volume de l'eau au cours de la fusion de la glace... En 3^e, on mesure des distances et des temps, pour accéder à la notion de vitesse moyenne, tandis que la relation entre masse et poids invite à mesurer ces deux types de grandeurs. Pour une résistance, l'ohmmètre permet de comparer son indication au quotient U/I des indications de deux appareils déjà connus. En chimie, enfin, l'usage du pH-mètre n'est pas exclu. On pourrait multiplier les exemples qui posent le problème de la mesure et celui des chiffres significatifs qui sont, au moins partiellement, liés : après un mesurage, effectué par les élèves ou le professeur, on doit en effet afficher le résultat (la mesure) et on utilise pour cela une unité et un certain nombre de chiffres significatifs.

Très tôt, en 4^e certainement, il faut montrer aux élèves que les indications fournies par les appareils de mesure sont entachées de petites erreurs et que, de ce fait et, parfois aussi, du fait de l'expérimentateur lui-même, il n'y a pas tout à fait coïncidence entre la valeur exacte d'une grandeur mesurée et la lecture de la mesure correspondante.

En 3^e, on peut remarquer que de nombreuses grandeurs mesurées dépendent légèrement de facteurs physiques (température, pression...) susceptibles d'évoluer en fonction du temps de manière incontrôlée. D'autres, comme les dimensions d'une table rectangulaire en bois, le diamètre d'une sphère imparfaite, ne sont définies qu'avec une certaine précision.

Trois exemples

Choix du nombre de chiffres significatifs pour exprimer le résultat d'une mesure

D'une façon générale, compte tenu du matériel présent dans les collèges, on peut prendre pour hypothèse que les mesures électriques se font avec une précision de l'ordre de un pour cent.

Dans ces conditions, si un multimètre utilisé en voltmètre affiche 12,54 volts, on retiendra que seuls les trois premiers chiffres sont significatifs et on écrira $U = 12,5 \text{ V}$, ce qui sous-entend que seul le dernier chiffre 5 est incertain.

Si la mesure avait été $U = 9,95 \text{ V}$, mesure toujours à 1 %, on n'aurait gardé que deux chiffres significatifs : $U = 9,9 \text{ V}$.

Remarque : supposons que l'on dispose de la fiche constructeur d'un multimètre numérique récent qui donne des indications permettant de calculer l'incertitude liée à la mesure pour une utilisation en voltmètre continu, telles que :

– précision : $0,8 \% \text{ VL} + 2 \text{ UR}$ (VL = valeur lue, UR = unité de représentation c'est-à-dire la valeur de l'unité de la mesure du dernier chiffre affiché) ;

– si, sur le calibre 20 V, on lit $U = 12,54 \text{ V}$ (VL = 12,54 V ; 1 UR = 0,01 V), alors l'incertitude sur U d'après le constructeur est $\Delta U = (0,8/100 \times 12,54 + 0,02) \text{ V}$, soit $\Delta U = 0,12 \text{ V}$.

La valeur exacte de U, d'après le constructeur, est telle que : $12,54 \text{ V} - 0,12 \text{ V} < U < 12,54 \text{ V} + 0,12 \text{ V}$ soit :

$12,42 \text{ V} < U < 12,66 \text{ V}$ et l'on peut écrire :

$$U = 12,54 \text{ V} \pm 0,12 \text{ V}.^4$$

Soulignons encore l'importance du nombre de chiffres significatifs à l'aide d'un autre exemple : si la capacité V d'une citerne est $2,75 \text{ m}^3$, elle peut certes s'exprimer en mL, mais en écrivant $V = 2,75 \times 10^6 \text{ mL}$ et non $V = 2\,750\,000 \text{ mL}$, car cette dernière écriture, qui sous-entend que la capacité est connue au millilitre près, ne traduit pas exactement l'information initiale.

Grandeur tirée d'un calcul

La précision du résultat final ne peut être meilleure que celle de la grandeur la moins précise. Le nombre de chiffres significatifs du résultat est souvent le même que celui de la grandeur utilisée qui en possède le moins.

Soit, par exemple, le calcul de $R = \frac{U}{I}$; si U est connu à 1 % et I à 1 %, R ne peut certainement être déterminé à mieux que 1 %.

Si $U = 12,5 \text{ V}$ et $I = 2,10 \text{ mA}$ alors :

$$R = \frac{12,5}{0,0021} = 5952,380952 \Omega, \text{ résultat affiché par la machine !}$$

La précision étant au mieux 1 %, $\Delta R = 0,01 \times R \approx 60 \Omega$.

On écrira donc le résultat avec deux chiffres significatifs :

$R = 6,0 \text{ k}\Omega$ et non pas $R = 6\,000 \Omega$, résultat qui en comporte 4.

Confrontation de mesures avec une loi

Pour un montage en dérivation en courant continu, la loi des nœuds exprimée par la relation

$I = I_1 + I_2$ découle du principe très général de conservation de la charge électrique. On peut vérifier que les mesures, compte tenu des incertitudes qui les entachent, sont compatibles avec la loi testée.

3. Ce texte s'inspire très fortement d'un document plus complet publié sous la responsabilité du groupe physique-chimie de l'inspection générale et consultable sur le site internet du ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie à l'adresse www.education.gouv.fr/sec/phy/phchnte.htm.

4. On peut écrire le résultat sous la forme $U = 12,5 \text{ V}$, mais il est possible de montrer que cette nouvelle écriture correspond à une perte d'information par rapport à la précédente.



Exemple : sur le calibre 200 mA, on a lu : $I = 188,7 \text{ mA}$; $I_1 = 121,3 \text{ mA}$; $I_2 = 70,8 \text{ mA}$.

Pour des mesures à 1 %, on en déduit :

$187 \text{ mA} < I < 191 \text{ mA}$; $120 \text{ mA} < I_1 < 122,5 \text{ mA}$;

$70 \text{ mA} < I_2 < 72 \text{ mA}$ et $190 \text{ mA} < I_1 + I_2 < 195 \text{ mA}$.

L'écart entre I_{\min} et $(I_1 + I_2)_{\max}$ est égal à 8 mA, soit un écart relatif maximal entre I et $I_1 + I_2$ de l'ordre de 4 %.

Les mesures de I , I_1 et I_2 , compte tenu des incertitudes qui les entachent, sont donc compatibles avec la loi.

Remarque : au cours d'une expérience les valeurs lues peuvent ne pas être les mêmes en début et en fin d'expérience ; ceci peut provenir des composants du montage qui, traversés par des courants, ont des grandeurs caractéristiques (résistances) qui varient en fonction la température.

Conclusion

La plupart des considérations qui précèdent sont bien entendu au seul usage des professeurs. Au cours de cette première étape de sensibilisation aux résultats de mesure, il importe surtout d'être attentif à la notion de chiffres significatifs et à la cohérence des résultats de certains calculs : le résultat d'un calcul simple portant sur deux variables expérimentales ne peut pas être plus précis que la variable la moins précise.

À l'occasion de telle ou telle manipulation, on pourra mettre en évidence que des grandeurs sont définies avec une certaine imprécision (hauteur d'une colonne de liquide dans un tube, distance focale d'une lentille en lumière blanche), que d'autres peuvent légèrement varier en fonction de paramètres physiques non maîtrisés : on en déduira le nombre de chiffres significatifs à conserver. Mais ceci ne fera pas l'objet d'un cours. De même, c'est lorsque l'occasion se présentera, c'est-à-dire peut-être une ou deux fois dans l'année, que l'on effectuera plusieurs mesures indépendantes d'une même grandeur dans le but de mettre en évidence la dispersion naturelle des mesures⁵. On en profitera alors, sans plus, pour obtenir une meilleure estimation de la grandeur mesurée en effectuant la moyenne des mesures.

D. Approche transdisciplinaire de l'environnement

Introduction

Dès le cycle central, plusieurs disciplines inscrivent l'environnement en bonne place dans leurs préoccupations et insistent sur la nécessité d'une approche interdisciplinaire.

- **En histoire-géographie** : l'approche géographique de l'environnement et du paysage sera utilement confrontée aux approches des enseignants des sciences de la vie et de la Terre.

- **En sciences de la vie et de la Terre** : fonder un comportement responsable vis-à-vis de l'environnement. Les contributions à l'éducation à l'environnement sont soulignées au fil des différentes parties du programme. Elles méritent la plus grande attention. Au-delà de l'enseignement disciplinaire, les contributions appellent à une coordination avec d'autres disciplines appliquées.

- **En physique-chimie** : l'enseignement devra former le citoyen consommateur au bon usage des objets techniques ainsi qu'à celui des produits chimiques qu'il sera amené à utiliser dans la vie quotidienne. Cette éducation débouche naturellement sur l'apprentissage de la sécurité, sur la sauvegarde de la santé et sur le respect de l'environnement.

- **En technologie** : les réalisations sur projet contribuent à une prise de conscience des effets des choix technologiques sur l'environnement de façon complémentaire aux approches des sciences.

Dans les programmes de 3^e, on retrouve les mêmes préoccupations :

- **En éducation civique** : la société doit garantir, dans la solidarité, les qualités de l'environnement et de la vie aux générations futures. Pour montrer les enjeux et les choix politiques, on prend l'exemple de la gestion des déchets radioactifs et de la pollution de l'air.

- **En sciences de la vie et de la Terre**, il est prévu de consacrer huit heures au module E (Responsabilité humaine : santé et environnement).

- **En physique-chimie**, trois heures sont prévues dans le projet actuel pour traiter le module A3 (Les matériaux dans l'environnement).

Les sujets évoqués sont par ailleurs souvent convergents : recyclage des matériaux, gaz polluants, etc. ; il en est de même des méthodes proposées : enquêtes, analyse de documents, etc.

Quelques avantages de l'approche interdisciplinaire

Les disciplines concernées par ces questions liées à l'environnement ont tout intérêt à travailler ensemble. En effet, en procédant ainsi :

- on évitera la lassitude (voire le rejet) qui pourrait s'installer si plusieurs professeurs traitaient à divers moments de l'année des sujets identiques ;

- on économisera du temps en rationalisant les études effectuées ;

- l'équipe pédagogique témoignera par l'exemple d'un discours convergent sur un fait important de société ;

- les différentes disciplines n'apparaîtront plus rivales, mais complémentaires.

Exemple de stratégie

En début d'année, chaque discipline concernée met dans un « pot commun » la durée (en heures) qu'elle prévoit de consacrer aux questions liées à l'environnement ; elle fait la liste des thèmes qu'elle pense devoir aborder.

Un dossier environnement est ouvert en septembre ; il se remplit au fur et à mesure que l'année se déroule avec les contributions des différentes disciplines. Les éléments d'information qu'on y trouve sont de plusieurs natures : cours traditionnels, résultats d'enquêtes ou d'expériences, documents distribués par le professeur ou recherchés par les élèves.

5. La notion de dispersion d'une série statistique est au programme de mathématiques de la classe de 3^e.



Un certain nombre de sujets sont confiés à des groupes d'élèves (de 4 à 6) qui sont chargés de les traiter par écrit (réalisation d'un dossier avec objectifs affichés) et par oral (préparation d'un exposé).

Les sujets sont exposés dans la discipline la plus concernée ; parfois, on peut estimer que deux disciplines sont aussi concernées l'une que l'autre. Dans ce cas, on peut penser qu'un exposé devant les deux professeurs serait judicieux (cette possibilité ne pose pas de problème majeur si l'on pense que deux classes de 3^e peuvent parfaitement être réunies à cette occasion pendant un laps de temps qui peut ne pas excéder la demi-heure).

Les conditions requises

Cette stratégie suppose qu'un certain nombre de conditions soient remplies :

les professeurs concernés doivent se mettre d'accord en début d'année sur :

- ce que chacun traitera ;
- le type de travail qui sera proposé aux élèves ;
- les conditions dans lesquelles sera produite l'évaluation ;
- les documents, sorties,... qu'il faut prévoir ;
- un suivi régulier du dossier doit être opéré par tous les professeurs ; à cet égard, la meilleure solution semble être de réserver un onglet du cahier de textes à l'environnement et d'y noter avec régularité le travail effectué, la discipline concernée, les éléments d'évaluation proposés et surtout le travail demandé aux élèves.

Compte tenu de ce qui a été dit dans l'introduction, un tel dossier mériterait d'être ouvert avant la classe de 3^e ; ainsi, en classe de 4^e, l'étude des combustions délivre des informations particulièrement utiles pour traiter les gaz à effet de serre (CH_4 , CO et CO_2).

Un tel travail permet par ailleurs d'atteindre d'autres objectifs transdisciplinaires, et participe ainsi à la formation globale de l'élève : recherche et exploitation documentaires, utilisation de bases de données (à cet égard, on n'oubliera pas l'apport précieux que représente internet pour disposer de bases de données régulièrement actualisées), maîtrise du français écrit et oral.

Dans l'hypothèse d'une interdisciplinarité physique-chimie – sciences de la vie et de la Terre (deux des disciplines les plus concernées par l'environnement), la rubrique A3 du programme propose des « activités coordonnées faisant intervenir de façon concertée le professeur de SVT et le professeur de physique-chimie, chacun sur un horaire de trois heures ». Le programme définit le principe d'une telle coordination : « En début d'année, les deux professeurs choisissent un thème corrélé aux programmes des deux disciplines. Ils conviennent de la répartition de leurs interventions et des dates prévisionnelles de celles-ci. »

La fiche T1, placée dans la rubrique A3 de ce document et intitulée « Étude coordonnée physique-chimie – SVT d'un problème d'environnement », propose quelques exemples de thèmes envisageables et développe plus particulièrement l'un d'entre eux, celui des pluies acides.

PARTIE THÉMATIQUE

Des matériaux au quotidien

A. Quelques propriétés des matériaux

E1. Reconnaître un matériau parmi trois familles possibles : métaux, matières plastiques, verres

Objectifs

Il s'agit, dans une liste finie et donnée d'objets (voir fiche p. 32), de proposer par une série de tests de :

- les classer dans l'une des trois familles, les métaux, les matières plastiques, les verres ;
- identifier le nom du matériau qui constitue l'objet.

En aucun cas, ces propositions ne prétendent fournir une méthode générale permettant d'identifier un matériau quelconque, mais elles veulent souligner l'aspect méthodique de la recherche dans le cadre donné d'une classe de collège.

Il faudra différencier dans cette étude le cas des métaux dont certains sont mentionnés par le programme (cuivre, fer, aluminium) et celui des matières plastiques pour lesquelles aucune connaissance exigible n'est demandée.

Méthode de reconnaissance des familles de matériaux

Pour classer un des matériaux de la liste fournie dans l'une des trois grandes familles choisies, les élèves suivent la méthode (voir document 1, p. 37), en respectant les étapes des tests spécifiques.

Méthode de reconnaissance de matériaux parmi quelques possibilités : métaux (Al, Cu, Fe) ; matières plastiques (PE, PS, PCV, PET)

On pourra poursuivre la recherche en essayant d'identifier dans la famille des métaux le cuivre, le fer (ou un acier) et l'aluminium, et dans celle des matières plastiques le polyéthylène, le polystyrène (non expansé PS), le polychlorure de vinyle (PCV) et le polyéthylène téréphtalate (PET) (voir document 2, p. 23). On rappelle qu'aucune connaissance relative à une matière plastique particulière n'est exigible. En ce qui concerne les matières plastiques, on pourra s'aider de la fiche de savoir-faire, p. 24.



LISTE POSSIBLE D'OBJETS FOURNIS DANS UNE BOÎTE

Il est nécessaire de constituer pour chaque groupe d'élèves une réserve d'objets constitués des matériaux étudiés. Quand cela sera possible, on utilisera avec profit des échantillons d'objets de la vie courante (emballages alimentaires entre autres). On pourra numéroter ces objets pour faciliter les échanges avec les élèves durant leur recherche.

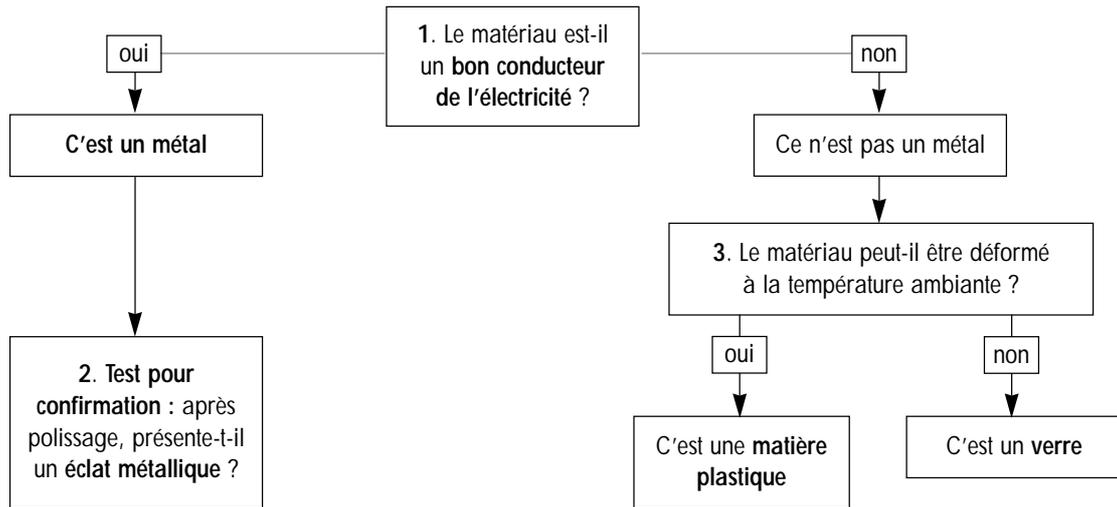
N°	Objets	Famille	Matériaux à trouver
1	Tuyau de chauffage	Métal	Cuivre
2	Canette	Métal	Aluminium
3	Morceau de gouttière	Métal	Zinc
4	Objet	Métal	Acier
5	Corde blanche	Plastique	Polyéthylène
6	Sac plastique d'emballage fin	Plastique	Polyéthylène
7	Emballage pot de yaourt	Plastique	PS ou PE
8	Fil électrique	Métal et plastique	Cuivre et PVC
9	Pot de yaourt nature	Verre	Verre
10	Morceau de bouteille de boisson gazeuse	Plastique	PET
11	Échantillon de bouteille d'eau minérale	Plastique	PVC ou PE
12	Certains bouchons de bouteille d'eau minérale	Plastique	PE

Compléments scientifiques pour le professeur sur ces matières plastiques

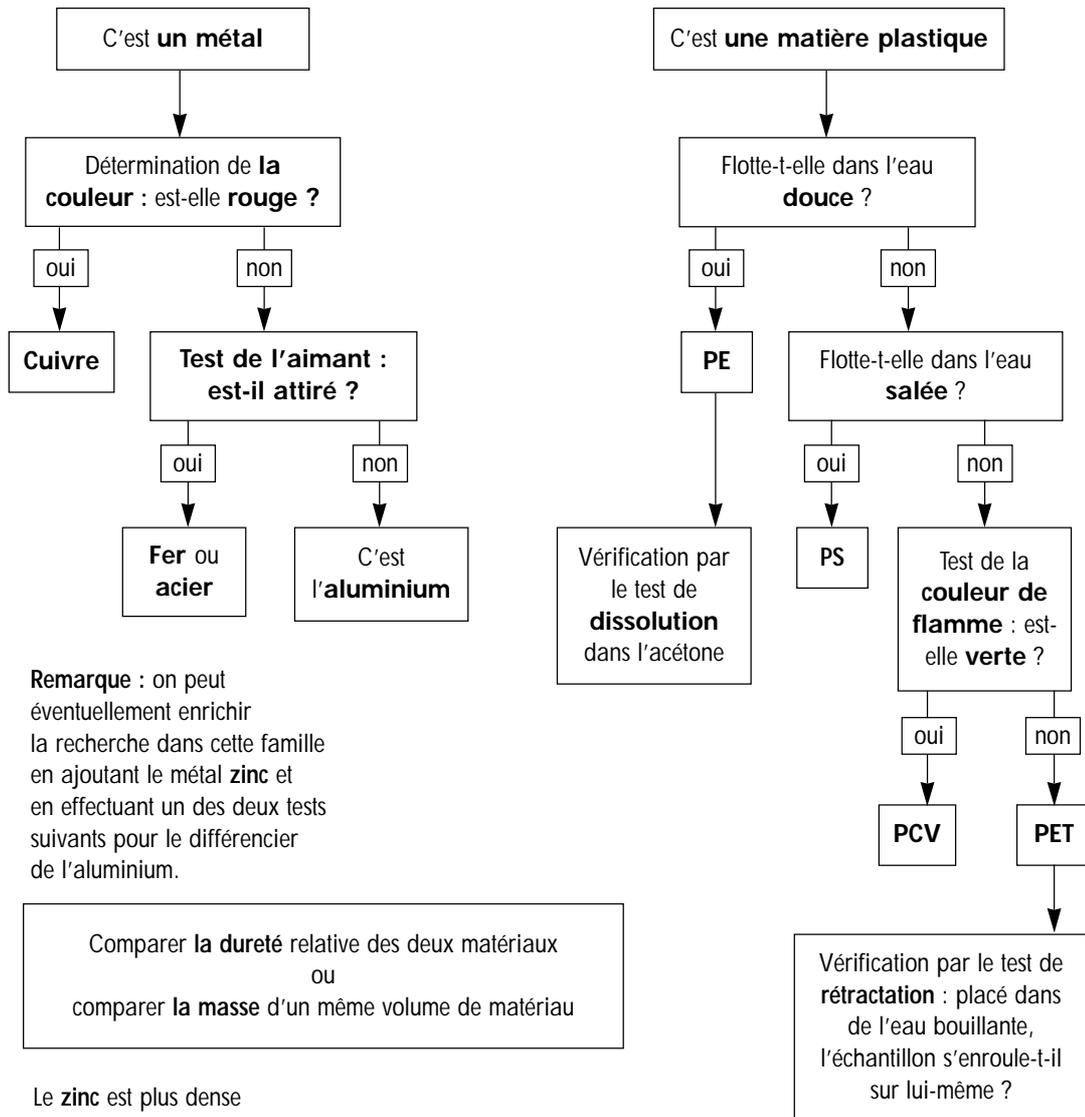
MATIERE PLASTIQUE	ABREVIATION	MOTIF	MONOMERE
Polyéthylène	PE	$\text{---} \left[\text{--- CH}_2 \text{--- CH}_2 \text{---} \right]_n \text{---}$	Ethylène
Polypropylène	PP	$\text{---} \left[\text{--- CH}_2 \text{--- CH ---} \right]_n \text{---}$ <div style="text-align: center; margin-left: 100px;"> $\begin{array}{c} \\ \text{CH}_3 \end{array}$ </div>	Propylène
Polystyrène	PS	$\text{---} \left[\text{--- CH}_2 \text{--- CH ---} \right]_n \text{---}$ <div style="text-align: center; margin-left: 100px;"> $\begin{array}{c} \\ \phi \end{array}$ </div>	Styrène
Polyéthylène téréphtalate	PET	$\text{---} \left[\text{---} \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} \text{--- C}_6\text{H}_4 \text{---} \overset{\text{O}}{\parallel} \text{C} \text{--- O --- CH}_2 \text{--- CH}_2 \text{--- O ---} \right]_n \text{---}$	Monoéthylène glycol diméthyltéréphtalate
Polychlorure de vinyle	PVC	$\text{---} \left[\text{--- CH}_2 \text{--- CH ---} \right]_n \text{---}$ <div style="text-align: center; margin-left: 100px;"> $\begin{array}{c} \\ \text{Cl} \end{array}$ </div>	Chlorure de vinyle



Document 1



Document 2



Remarque : on peut éventuellement enrichir la recherche dans cette famille en ajoutant le métal **zinc** et en effectuant un des deux tests suivants pour le différencier de l'aluminium.

Comparer la **dureté** relative des deux matériaux
ou
comparer la **masse** d'un même volume de matériau

Le **zinc** est plus dense



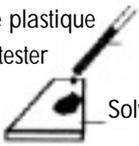
Test de flottabilité pour le polyéthylène PE et le polystyrène PS

Manipulation	Conclusion
<p>Expérience :</p> <p>1. Ce qu'il y a à faire</p> <p>Phase n° 1 : Découpe des échantillons de plastiques</p>  <p>Phase n° 2 : On sature de sel</p> 	<p>Les échantillons qui flottent sur l'eau douce sont essentiellement PE</p> <p>La masse volumique est plus petite que celle de l'eau (1g/cm³)</p> <p>Les échantillons qui flottent sur l'eau salée sont faits de PS</p> <p>Les échantillons qui coulent dans l'eau salée sont le PCV et le PET</p> <p>Il reste à différencier le PCV du PET</p>
<p>2. Ce que l'on peut observer</p> <p>Certains échantillons flottent, d'autres coulent</p> <p>Des échantillons remontent à la surface</p>	

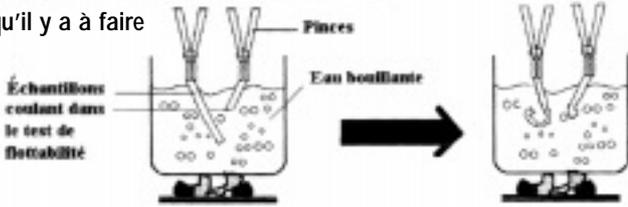
Test de la couleur de la flamme pour le PCV (à faire à la paillasse du professeur)

Manipulation	Consignes	Conclusion
<p>Observer la couleur de la flamme après dépôt de matière plastique</p>  <p>Fil électrique</p>	<p>Prendre un fil électrique dénudé à un bout</p> <p>Le porter au rouge pour le nettoyer</p> <p>Déposer par contact à chaud un peu de matière plastique</p> <p>Replacer le fil dans la flamme et observer la couleur</p>	<p>Si la flamme se colore en vert, il s'agira de PCV</p> <p><i>Note pour le professeur :</i> la coloration est due à la présence simultanée des éléments cuivre et chlore</p>

Test de dissolution du polystyrène (à faire à la paillasse du professeur)

<p>Manipulation (attention, juste 3 gouttes d'acétone)</p> <p>1. Ce qu'il y a à faire</p> <p>Échantillon de plastique à tester</p>  <p>Solvant</p>  <p>Quelques minutes</p>  <p>Attaque</p>	<p>2. Ce que l'on peut observer :</p> <p>L'échantillon est attaqué</p> <p>3. Ce que l'on peut en conclure :</p> <p>Si l'échantillon est attaqué, c'est du polystyrène PS</p> <p>Conclusion</p> <p>Seul le PS ici est attaqué</p>
--	--

Test de réfraction pour le PET (à faire au bureau du professeur)

Manipulation	Conclusion
<p>1. Ce qu'il y a à faire</p>  <p>Échantillons coulant dans le test de flottabilité</p> <p>Pinces</p> <p>Eau bouillante</p>	<p>L'échantillon qui s'enroule sur lui-même est composé essentiellement de PET</p>
<p>2. Ce que l'on peut observer</p> <p>L'échantillon peut se rétracter en s'enroulant sur lui-même</p>	

C1. Matériaux conducteurs et matériaux isolants, utilisés dans l'installation électrique domestique et dans les appareils électriques

Remarques

- Le cuivre est très utilisé en électricité pour trois propriétés :

- excellente conductibilité électrique ;
- résistance à la corrosion ;
- grande ductilité (possibilité d'étirage en fils). Pour des pièces conductrices demandant une résistance mécanique et un usinage, les laitons (alliages de cuivre et de zinc) sont alors préférés ; mais, si la résistance mécanique et la dureté s'améliorent lorsque la teneur en zinc augmente, la température de fusion et la conductibilité électrique diminuent.

Deux autres métaux sont aussi présents en très faible quantité dans l'appareillage électrique domestique : l'argent, sous forme de pastilles aux points de contact de rupture (interrupteurs) et l'aluminium (petits moteurs électriques).

- l'amiante est un isolant minéral (silicate de chaux et de magnésie) qui résiste aux hautes températures ; il a été utilisé comme support de résistances chauffantes électriques (anciens fers à repasser) mais l'inhalation de fibres d'amiante présente un grave danger pour la santé.

- la plupart des matières plastiques utilisées comme isolants en électricité sont des thermoplastiques. Leurs transformations utilisent essentiellement deux procédés :
 - l'extrusion qui permet le revêtement et le gainage des fils électriques ;
 - l'injection qui permet la réalisation des pièces dans un moule (boîtiers des interrupteurs, prises de courant, etc.).

Installations électriques fixes	Matériau conducteur	Matériau isolant
Lignes	Cuivre	Polychlorure de vinyle (PVC) Éthylène-Propylène Polyéthylène réticulé (PE)
Interrupteurs prises de courant	Laiton Argent (contacts dans les interrupteurs)	Porcelaine (anciens) Polycarbonate (PC) Polypropylène (PP) Polybutylène téréphtalate (PBT) Polyéthylène téréphtalate (PET)
Cartouches fusibles	Alliage Al, Cu, Zn, Ag pour le fil fusible	Stéatite pour le tube
Appareillage électrique	Matériau conducteur	Matériau isolant
Cordons	Cuivre	Polychlorure de vinyle (PVC) Caoutchouc Polychloroprène (Néoprène)
Appareils domestiques	Laiton Aluminium Cuivre	Acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS) Polystyrène (PS) Polypropylène (PP) Phénoplastes (PF) (bakélite) Verre Silicium/Sodium/Calcium (lampes)

D1⁶. L'aluminium : production, propriétés et utilisations, recyclage

Comment obtient-on l'aluminium ?

L'aluminium est le métal courant le plus abondant sur Terre.

L'écorce terrestre contient :

- 47 % d'oxygène ;
- 28 % de silicium ;
- 25 % d'autres éléments dont 8 % d'aluminium.

Les réserves minières, très importantes, sont estimées à plus de 20 milliards de tonnes ; elles sont largement dispersées dans le monde.

L'aluminium n'existe pas à l'état natif, c'est-à-dire sous forme métallique.

En 1831, le minéralogiste Berthier découvre le minerai d'aluminium près des Baux-de-Provence : ce minerai s'appellera **bauxite**.

L'élaboration de l'aluminium à partir du minerai est difficile, et il faut attendre 1886 pour que l'Américain Hall et le Français Héroult mettent au point, chacun de leur côté, un procédé industriel de production, par électrolyse, seul procédé toujours utilisé actuellement.

Pour produire l'aluminium, la bauxite est broyée puis traitée par voie chimique, à température élevée, de façon à obtenir de l'oxyde d'aluminium, encore appelé alumine, de bonne

6. Ce document d'information peut être remis aux élèves et être exploité par eux, dans le cadre d'une étude documentaire ; il a été élaboré à partir d'informations fournies par la Chambre syndicale de l'aluminium et de ses alliages.



pureté. On réalise ensuite l'électrolyse de l'alumine fondue — il ne s'agit pas de l'électrolyse d'une solution aqueuse — dans de grandes cuves, à une température proche de 1 000°C. Moyennant un coût important en énergie, cette électrolyse conduit à l'aluminium.

Comment expliquer les principales utilisations de l'aluminium ?

L'aluminium est un très bon conducteur du courant électrique ; cette propriété, alliée à sa légèreté et à son coût de revient, explique qu'on utilise ce métal pour la fabrication de câbles pour la distribution de l'électricité.

La conductivité thermique (aptitude au transport d'énergie sous forme thermique) de l'aluminium et sa légèreté sont à l'origine de son emploi dans la confection de radiateurs et de pièces de moteurs automobiles.

Protégé par une mince couche d'oxyde d'aluminium (son épaisseur est de l'ordre du nanomètre), l'aluminium ne s'altère pratiquement pas à l'air. Cette propriété est mise à profit dans la réalisation d'objets qui résistent au temps et ne nécessitent que de très peu d'entretien, comme les profilés. La résistance à la corrosion et la ductilité de l'aluminium font que ce métal est utilisé pour l'emballage alimentaire et la confection de boîtes pour boissons.

Comment recycler l'aluminium ?

L'aluminium peut être recyclé ; 30 % des besoins français en aluminium sont assurés par recyclage, ce qui correspond à une masse annuelle de 350 000 tonnes.

Pour permettre le recyclage de l'aluminium contenu dans les emballages, deux voies sont mises en pratique :

- **la collecte sélective** : elle convient particulièrement aux emballages rigides ou semi-rigides (boîtes pour boissons, boîtes de conserves, barquettes de plats surgelés, conditionnement d'aérosols).

La collecte sélective multimatériaux fonctionne maintenant dans de nombreuses communes ou groupements de communes, où sont installés près de 150 centres de tri qui ont récupéré environ 300 tonnes d'aluminium en 1997. Ces quantités, assez modestes, dépendent de l'organisation des centres. L'amélioration de leurs performances proviendra de leur niveau d'équipement, de l'information et de l'action des consommateurs qui devront effectuer le « bon geste » pour l'utilisation des différentes poubelles (verre, papier, métaux-plastiques).

Pour les boîtes pour boissons, un circuit spécifique de récupération est concevable, comme le montre l'exemple des États-Unis : 100,7 milliards de boîtes pour boissons (toutes en aluminium) y ont été consommées en 1997 et 66,5 % d'entre elles ont été recyclées, grâce à une collecte monomatériau, pour la fabrication de nouvelles boîtes pour boissons. Ce recyclage dit « en boucle fermée » est rendu possible en raison de la qualité du produit issu de la collecte monomatériau et de l'importance du gisement.

Il faudra sans doute attendre plusieurs années pour que ce système occupe une place comparable dans les pays européens, car la consommation annuelle de boîtes est six fois plus faible en Europe (64 boîtes/habitant dont 29 en

aluminium) qu'aux États-Unis (374 boîtes/habitant, toutes en aluminium) ;

- **l'extraction des métaux des cendres d'incinération** : en France, plus de 40 % des ordures ménagères sont incinérées. L'incinération produit 20 à 30 % de résidus solides, les mâchefers. Ces derniers contiennent de l'acier et des métaux non ferreux que l'on peut séparer, notamment par l'emploi de procédés magnétiques. La quantité d'aluminium ainsi obtenue a représenté 3 000 tonnes en 1997.

L'incinération est également une solution pour « valoriser » les emballages souples en aluminium et ceux de type aluminium/carton et aluminium/plastique. Au cours du traitement, l'aluminium est oxydé ; cette réaction chimique dégage une énergie d'environ 31 mégajoules par kilogramme d'aluminium, soit autant que la combustion d'un kilogramme de charbon.

B. Comportement chimique de quelques matériaux

H1. Les modèles de l'atome

La première partie de ce texte propose une présentation historique, destinée aux professeurs, la seconde partie présente des suggestions pédagogiques et se conclut par quelques formulations susceptibles d'être transmises aux élèves.

Présentation historique⁷

L'histoire des modèles atomiques est inséparable de celle des connaissances relatives aux particules chargées. Celle-ci commence avec l'établissement en 1833 des lois de l'électrolyse par l'Anglais Michael Faraday (1791-1867). L'interprétation de ces lois conduit au concept d'ion (du grec *ἰων*, allant).

En 1881, l'Anglais Joseph John Thomson (1856-1940) suggère que les rayons cathodiques sont constitués de particules chargées négativement que son compatriote Johnstone Stoney (1826-1911) baptise électrons en 1891 ; cette hypothèse est confirmée en 1895 par le Français Jean Perrin (1870-1942). En 1897, Thomson mesure la charge massique e/m de l'électron⁸.

Au tout début du XX^e siècle, une ambition naturelle des théoriciens est de proposer un modèle de l'atome en précisant notamment la répartition de la charge électrique à l'intérieur de celui-ci. Un théorème dû à l'Anglais Earnshaw fixe des limites à l'imagination des auteurs de modèles. Il

7. Il s'agira d'une présentation des modèles atomiques dans une perspective historique. Pour l'histoire de la théorie atomique, on se reportera notamment à la fiche correspondante du document d'accompagnement du programme du cycle central.

8. L'intervention de l'électron dans l'explication d'un grand nombre de phénomènes découverts au tournant du siècle (effet photoélectrique, émission thermoionique, radioactivité) a contribué de façon décisive à la victoire des « atomistes », convaincus du caractère discontinu de la matière. Cette victoire, acquise définitivement au cours des dix premières années du XX^e siècle, tient également aux valeurs convergentes fournies pour la constante d'Avogadro N_A par un nombre toujours plus grand de méthodes fondées sur des principes très variés.



établit en effet qu'un système de charges ponctuelles, fixes dans le vide, ne peut pas être en équilibre stable sous la seule action de ses interactions électrostatiques mutuelles. Ainsi, la physique classique (non quantique) ne laisse ouvertes que deux possibilités :

- un modèle « statique » (dans lequel les charges restent fixes) ne peut décrire l'atome comme constitué uniquement de charges ponctuelles : une partie de la charge de l'atome doit être répartie sous forme de distribution volumique ;
- un modèle qui décrit l'atome comme constitué de charges ponctuelles ne saurait supposer celles-ci fixes, il est nécessairement « dynamique ».

• **Modèle de Thomson (1904)**

En 1904, J.-J. Thomson propose un modèle de type (a) qui décrit une charge positive « diluée » dans tout le volume de l'atome au sein duquel sont contenus des électrons ponctuels. Ce modèle rend compte correctement des ordres de grandeurs de plusieurs grandeurs physiques : potentiel d'ionisation de l'atome, champ électrique disruptif des gaz. Il associe également à l'atome une fréquence propre d'oscillation de l'électron dont l'ordre de grandeur n'est pas en contradiction avec les spectres observés ; le modèle est toutefois incapable de rendre compte de l'existence de raies multiples.

• **Modèle planétaire :**

Perrin, Rutherford, Bohr, Sommerfeld (1901-1915)

Dès 1901, le Français Jean Perrin (1870-1942) avait suggéré un modèle de type (b), dit « planétaire » car les électrons y sont supposés tourner autour d'un noyau positif à la manière dont les planètes orbitent autour du Soleil.

En 1909, les Allemands Hans Geiger (1882-1945) et Madsen, travaillant au laboratoire Cavendish de Cambridge sous la direction de l'Anglais Ernest Rutherford (1871-1937), élève de Thomson, « bombardent » une mince feuille d'or à l'aide de faisceaux de particules alpha dont Rutherford établit qu'elles sont des atomes d'hélium deux fois ionisés. Ils constatent que ces particules subissent des déviations importantes, parfois supérieures à 90°.

Rutherford améliore ces expériences et établit que le modèle de Thomson est incapable d'expliquer les déviations importantes observées. Il propose donc d'adopter un modèle planétaire dans lequel les électrons orbitent autour d'un noyau dans lequel sont concentrées la charge positive et la masse et dont les dimensions sont très inférieures à celles de l'atome.

En 1900, l'Allemand Max Planck (1858-1947) avait introduit l'hypothèse de la quantification des échanges d'énergie électromagnétique avec la matière, caractérisée par la constante h ; en 1905, Albert Einstein (1879-1955), alors suisse, avait rendu compte des principales caractéristiques de l'effet photoélectrique à l'aide de cette hypothèse.

En 1913, le Danois Niels Bohr (1885-1962) reprend dans le cas particulier de l'atome d'hydrogène le modèle de Rutherford et lui adjoint une hypothèse inspirée de cette « théorie des quanta » : il suppose que les seules orbites électroniques possibles sont des cercles caractérisés par un moment cinétique quantifié selon : $\sigma = mv r = n h / 2\pi$,

n entier. En appliquant les lois de la mécanique newtonienne, Bohr en déduit les rayons et les énergies des orbites quantifiées. Ce calcul conduit à un ordre de grandeur correct pour les dimensions de l'atome (de l'ordre du dixième de nanomètre) ainsi que pour son énergie d'ionisation (de l'ordre de quelques eV).

Le retentissement du **modèle de Bohr** est surtout dû au fait qu'il rend compte de la structure d'ensemble du spectre de l'atome d'hydrogène avec une très bonne précision. En revanche, ses fondements théoriques manquent de cohérence : l'hypothèse de quantification proposée est arbitraire ; de plus, dans le cadre de la théorie classique alors encore en vigueur, l'électron en mouvement est la source d'un rayonnement d'énergie électromagnétique aux dépens de son énergie mécanique, de telle sorte qu'il devrait très rapidement « tomber » sur le noyau.

En 1915, l'Allemand Arnold Sommerfeld (1868-1951) reprend le modèle de Bohr en considérant la possibilité d'orbites elliptiques et en prenant en compte les corrections relativistes justifiées par le fait que la vitesse de l'électron n'est pas tout à fait négligeable devant la célérité de la lumière⁹.

Ces ultimes « perfectionnements » du modèle planétaire (**modèle de Bohr-Sommerfeld**) ne concernent toujours que l'atome d'hydrogène et les rares cas (hydrogénoïdes) qui se ramènent à un problème à deux corps¹⁰. Ils expliquent l'une des causes de la structure fine des raies spectrales mais ne rendent toujours pas compte de l'ensemble des spectres observés et laissent très critiquables les fondements même du modèle.

• **Modèle quantique (à partir de 1925)**

Issue des idées avancées en 1923 par le Français Louis de Broglie (1892-1987) et formalisée à partir de 1925, essentiellement par l'Allemand Werner Heisenberg (1901-1976) et l'Autrichien Erwin Schrödinger (1887-1961), la mécanique quantique décrit l'atome d'une façon profondément renouvelée. Elle abandonne notamment pour l'électron le concept de trajectoire et introduit ceux de fonction d'onde et de probabilité de présence.

Si on considère par exemple l'état fondamental ($n=1$) de l'atome d'hydrogène, l'image ainsi donnée est profondément différente de celle de Bohr : il n'est plus question d'un électron ponctuel animé d'un mouvement orbital ($\sigma=h/2\pi$) mais d'une charge électrique délocalisée. Cette charge est de plus sans mouvement de rotation : le moment cinétique vaut 0 au lieu de la valeur $h/2\pi$ qui était l'hypothèse de départ de Bohr !

Ce **modèle quantique** de l'atome échappe aux contradictions des modèles classiques (préquantiques). Il est perfectionné jusqu'à la fin des années quarante¹¹, notamment

9. $v/c = \alpha - 1/137$ sur la « première orbite de Bohr » ($n=1$).

10. L'étude d'un atome quelconque constitue un « problème à n corps » dans la mesure où, en plus des interactions électron-noyau, il faut prendre en compte les interactions entre électrons.

11. Époque à laquelle arrive à maturité, grâce notamment au Japonais Shi Ichiro Tomonaga et aux Américains Julian Schwinger et Richard Feynman, l'électrodynamique quantique, synthèse de la théorie électromagnétique classique de Maxwell et de la mécanique quantique.



grâce au développement, par l'Anglais Maurice Dirac (1902-1984), d'une théorie quantique et relativiste. À l'heure actuelle, l'accord entre les calculs théoriques issus du modèle quantique et les observations relatives au spectre de l'hydrogène atteint dix chiffres significatifs.

Suggestions pédagogiques

On entend souvent demander s'il faut « enseigner le modèle de Bohr ». Les rappels historiques ci-dessus permettent de préciser les termes de ce vieux débat.

Au niveau du premier cycle universitaire, la question ainsi posée sous-entend la présentation d'une suite de calculs bien connus. En dehors de l'hommage historique, leur intérêt pédagogique est critiquable dans la mesure où ils reposent sur des hypothèses hétéroclites, ni classiques ni vraiment quantiques. Présentés sans les précautions indispensables et en dehors du cadre strict d'un exposé historique, ils risquent de laisser dans les esprits des étudiants des idées fausses et indélébiles.

Au moment où la structure de l'atome est présentée pour la première fois, c'est-à-dire au collège, le problème est tout à fait différent. Si l'on admet qu'il est nécessaire de fournir aux adolescents une première image mentale de l'atome et donc de « faire un dessin »¹², la représentation d'électrons ponctuels est inévitable dans la mesure où une représentation d'électrons délocalisés (sous forme de « nuages ») est pratiquement inaccessible à des débutants, en tous cas pour des atomes polyélectroniques.

Ce choix pédagogique ne revient pas à « enseigner le modèle de Bohr » mais à présenter le modèle planétaire tel qu'il était au début du XX^e siècle : un noyau autour duquel se déplacent un ou plusieurs électrons, sans faire référence à des orbites privilégiées.

L'image proposée ne prétend pas être une représentation définitive de la réalité, l'élève doit savoir qu'il rencontrera dans la suite de ses études un modèle plus récent, plus « performant » en ce sens qu'il permet de rendre compte d'un plus grand nombre de faits expérimentaux.

Ce qui importe est de faire mémoriser d'emblée des caractéristiques de l'atome que l'étude du modèle quantique ne remettra pas en cause :

- la charge positive de l'atome et sa masse sont concentrées au centre de celui-ci dans une région appelée noyau ;
- la charge négative est répartie dans le cortège électronique qui entoure le noyau ;
- les dimensions de l'atome sont de l'ordre du dixième de nanomètre ;
- les dimensions du noyau sont environ 100 000 fois inférieures.¹³

C2. Complexité de la structure de la rouille

La formation de rouille résulte d'un processus de corrosion ; celle-ci consiste en la destruction d'un métal par réaction chimique avec l'atmosphère ambiante. Le terme « rouiller » se réfère exclusivement à la corrosion du fer, ou des alliages contenant du fer, avec formation de produits qui contiennent essentiellement des oxydes de fer. Des métaux

autres que le fer peuvent se corroder mais ne rouillent pas. La rouille n'est pas le nom usuel d'un composé chimique donné. Elle désigne en réalité un mélange complexe de différents oxydes et hydroxydes de fer. Elle est communément décrite comme un mélange des trois composants principaux : la magnétite, la goethite et la lépidocrocite, trois oxydes de fer que nous décrivons ci-dessous, ainsi que leur mode de formation. Ce qui ajoute à la complexité structurale de la rouille, c'est que sa composition dépend des conditions de sa formation, et en particulier de la composition de l'atmosphère dans laquelle se trouve le fer.

Principaux constituants chimiques de la rouille

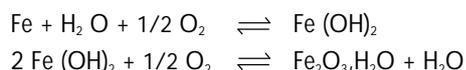
La magnétite a pour formule Fe_3O_4 ; il s'agit donc d'un oxyde « mixte » contenant à la fois des ions ferreux (Fe^{2+}) et ferriques (Fe^{3+}). Comme nous le décrivons plus loin, sa formation ne résulte pas directement de l'oxydation du fer par le dioxygène O_2 . La goethite et la lépidocrocite ont la même composition chimique, il s'agit d'oxydes de fer (III) hydratés dont la formule chimique peut s'écrire $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. La couleur des oxydes $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ est brun-rouge, caractéristique de la rouille observée habituellement. Goethite et lépidocrocite sont deux variétés allotropiques distinctes de l'oxyde de fer (III), c'est-à-dire que leurs réseaux cristallins sont différents.

La goethite est ainsi notée $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et la lépidocrocite $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$. C'est la forme α qui est la plus stable mais elle se forme plus lentement que la forme γ ; une étude de corrosion atmosphérique accélérée du fer a montré ainsi la formation majoritaire de lépidocrocite.

Il faut ajouter que ces trois oxydes sont peu adhérents à la surface du fer ; la rouille tend à se détacher facilement ce qui permet à l'attaque du métal de se poursuivre, celui-ci restant en contact avec l'atmosphère.

Mécanisme de formation de la rouille

C'est le dioxygène O_2 de l'atmosphère qui déclenche la formation de rouille, en présence nécessaire d'eau ; il diffuse au travers du film d'eau recouvrant le fer et l'oxyde lorsqu'il en atteint la surface. Cette attaque, qui consiste en fait simplement en une réaction d'oxydoréduction, est d'autant plus rapide que l'eau contient des ions, sulfate SO_4^{2-} et chlorure Cl^- . D'ailleurs, ces derniers sont très présents en milieu marin où l'on sait que la rouille se forme rapidement. L'oxydation du fer conduit à la formation d'hydroxyde de fer (II) dans un premier temps ; celui-ci est alors oxydé à son tour par le dioxygène O_2 . Les deux réactions suivantes se produisent donc :



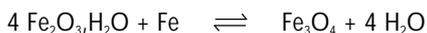
12. Cette nécessité est contestée par certains auteurs. L'introduction de ce que Halbwachs appelle un « modèle image » nous semble difficilement évitable à ce niveau d'enseignement. Il convient toutefois d'être conscient du risque de confusion entre le modèle et la réalité.

13. Les dimensions citées sont de simples ordres de grandeur, à une puissance de dix près. Elles dépendent bien entendu de la nature de l'atome considéré.



Le bilan de ces réactions montre la nécessité de dioxygène et d'eau pour qu'il se forme de la rouille.

La formation de magnétite peut s'expliquer par le rôle d'oxydant que peut jouer l'oxyde de fer (III) vis-à-vis du fer, ce qui peut être traduit par la réaction suivante :



Le fer peut donc être oxydé par le dioxygène et par l'oxyde de fer (III).

La couche de rouille peut donc être décrite de façon simplifiée comme la superposition d'une couche de Fe_3O_4 adjacente au métal, relativement dense, et d'une couche extérieure de $\text{Fe}_2\text{O}_3, \text{H}_2\text{O}$ assez poreuse.

Influence du milieu extérieur sur la formation de la rouille

La constitution réelle de la rouille est souvent plus complexe, et ce d'autant qu'elle dépend de l'atmosphère de corrosion. Par exemple, la présence d'ions chlorure Cl^- , l'eau recouvrant le fer, comme cela peut être le cas d'une atmosphère marine, peut conduire, lors de la corrosion, à la formation de chlorure ferreux. De même, la dioxyde de soufre SO_2 , polluant atmosphérique, peut conduire à l'acide sulfurique H_2SO_4 après réaction avec l'eau puis le dioxygène de l'air, et générer dans l'eau au contact du fer des ions sulfate SO_4^{2-} pouvant conduire à la formation de sulfate ferreux. Aux trois constituants précédemment cités peuvent donc s'ajouter des hydroxydes, sulfates et chlorures de fer en quantité variable. Par exemple, la « rouille » verte correspond à la formule :



La composition de la rouille est donc très intimement liée aux conditions dans lesquelles elle se forme.

Conclusions pédagogiques

Les informations ci-dessus sont destinées au professeur et peuvent lui permettre de prendre conscience de la complexité du sujet. Pour l'élève, on se contentera de dégager quelques points essentiels :

- la rouille est un mélange complexe renfermant différents oxydes de fer ;
- sa formation est favorisée par la présence d'ions (atmosphère marine, pluies acides, voir fiche T1) ;
- son caractère poreux permet la poursuite de l'attaque du fer jusqu'à disparition progressive de tout le volume du métal (à la différence d'autres métaux qui se recouvrent, par oxydation, d'une couche d'oxyde protectrice comme l'alumine Al_2O_3 sur l'aluminium).

C3. Coups de poussière dans les mines et les silos

Le « coup de poussière » est, après le coup de grisou, le phénomène explosif le plus connu dans les mines de charbon. Plus récemment, la destruction de silos à grains a tragiquement montré qu'une explosion peut survenir, à la suite d'un amorçage, pour un mélange hétérogène constitué d'air et de particules combustibles en suspension.

Les conditions

Comme dans le cas d'un mélange gazeux, pour qu'il y ait risque d'explosion, il faut que soient en présence un comburant, l'oxygène de l'air, et un combustible, par exemple de la poussière en suspension, qu'elle soit de charbon (coup de poussière des houillères) ou végétale (silos à grains).

Le mélange est, à température ordinaire, métastable, c'est-à-dire qu'il est susceptible d'évoluer thermodynamiquement pour donner les produits de combustion, mais que, cinétiquement, la réaction est infiniment lente en l'absence d'un facteur déclenchant.

Il est exclu ici dans un cas aussi complexe d'écrire une équation bilan, mais le mélange final contient de la vapeur d'eau, du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, des poussières non brûlées, du diazote, tous à haute température, donc avec des molécules animées d'une vitesse beaucoup plus grande qu'à température ordinaire.

Le caractère explosif du mélange dépend bien évidemment de la pression, en général proche, ici, de la pression atmosphérique, de la température initiale et des proportions de combustible et de comburant.

Différences entre déflagration et détonation

L'explosion d'un mélange peut soit prendre un caractère déflagrant soit un caractère détonant. Il s'agit là de deux cas limites.

Dans la déflagration, la vitesse de déplacement de la surface en ignition est faible (quelques mètres par seconde), les gaz formés se déplacent en sens contraire de celui de la surface en ignition, les pressions mises en jeu ne dépassent pas quelques milliers de bars.

Dans la détonation, les vitesses et les pressions sont beaucoup plus considérables (des centaines de milliers de bars) ; les gaz se déplacent dans le même sens que la surface de décomposition.

Les explosions étudiées ici se situent plutôt dans la catégorie des déflagrations.

De l'état métastable à l'explosion

Le système considéré ici peut être modélisé comme suit : des matières combustibles sont stockées sous forme de lits (couches de grains) surmontées d'une atmosphère gazeuse (air) renfermant à des concentrations variables des particules combustibles qui, dans le cas d'un silo, sont issues de l'enveloppe des graines stockées. Par ailleurs, celles-ci sont susceptibles de s'échauffer par frottement.

L'atmosphère gazeuse est, pour éviter un début de combustion, bien ventilée, ce qui maintient la température et fait que la concentration en particules combustibles est faible : l'ensemble constitue donc bien un système métastable car, cinétiquement, il ne peut rien se passer : s'il se produit un échauffement localisé et modéré, celui-ci n'aura pas d'effet, car un transfert thermique s'effectuera vers l'extérieur par la ventilation.

En revanche, en cas d'arrêt ou d'insuffisance de ventilation, l'échauffement dû aux réactions d'oxydation lente de l'enveloppe des grains, ou bien aux frottements entre les grains,



va entraîner une accélération de la vitesse des molécules de dioxygène et des particules combustibles : les réactions d'oxydation vont être plus rapides et l'on va s'approcher du seuil critique d'inflammation, soit spontanée, soit provoquée comme cela peut l'être par une étincelle électrique issue de la machinerie.

On notera que l'état de division joue un rôle considérable dans l'accroissement du risque.

En effet, si l'on suppose les particules sphériques, le volume de chacune est proportionnel au cube r^3 de son rayon, mais la surface est proportionnelle à r^2 . Il en résulte que la surface **totale** des particules croît quand r diminue : en effet, pour une masse de particules donnée, le nombre de particules est inversement proportionnel à r^3 , la surface de chacune à r^2 , la surface totale de ces particules est donc proportionnelle à $r^2/r^3 = 1/r$. Ainsi, quand r diminue, la surface **totale** augmente.

Ainsi, l'état de division augmente la surface totale susceptible de réagir et donc le risque d'explosion.

En conclusion, s'il y a début d'échauffement notable, l'élévation de température va augmenter la vitesse des réactions d'oxydation. Au bout d'un moment, la température critique d'embranchement et de déflagration sera atteinte. Les installations doivent donc être ventilées de façon appropriée pour les maintenir à température assez basse et diminuer le taux de particules en suspension dans l'air (ce qui suppose de ne pas ventiler n'importe comment !) mais ces installations doivent aussi disposer d'installations électriques non déflagrantes.

Un raisonnement identique peut être adapté pour justifier les précautions d'emploi de certains aérosols, gouttelettes de solvants combustibles vaporisées parfois avec un gaz vecteur également très combustible. Il s'applique ainsi au cas d'une pièce mal ventilée dans laquelle un mélange métastable de dioxygène, de gaz vecteur et de gouttelettes

combustibles explose sous l'action d'une étincelle ou au contact d'une ampoule chaude.

E2. Combustion du fer et conservation de la masse

Manipulation

Professeur.

Objectif

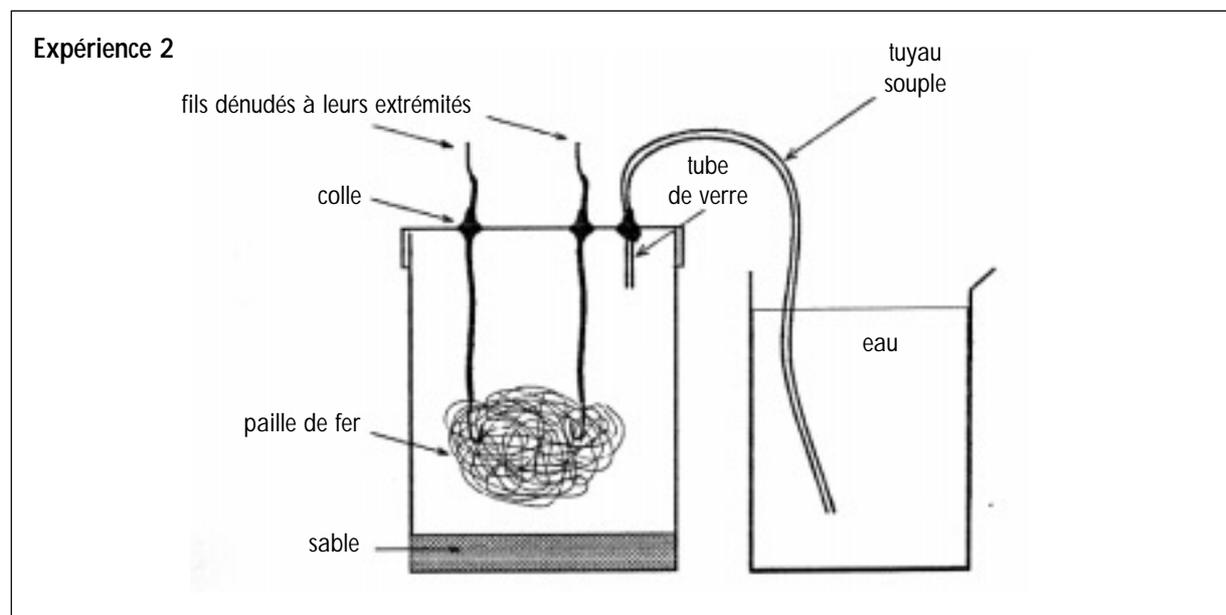
Conservation de la masse lors d'une réaction chimique.

Matériel

- Un bocal, genre bocal à confitures, avec couvercle fermant le plus hermétiquement possible, deux morceaux de fil électrique isolé (dénudé aux extrémités). L'étanchéité au niveau du passage des fils dans le couvercle est assurée par de la colle (pistolet à colle chaude recommandé).
- Un autre bocal analogue avec en plus un tuyau souple (voir dessin page suivante) : ce tuyau peut être par exemple de la « feuille anglaise » avec, au niveau du passage du couvercle, un tube de verre introduit à l'intérieur pour le rigidifier.
- Un bécher.
- De la paille de fer.
- Un générateur 6/12 V.
- Deux fils de connexion.
- Une balance Roberval ou électronique sensibilité 0,1 gramme.

Expérience 1

Combustion de la paille de fer à l'air libre sur la balance Roberval préalablement équilibrée ou sur la balance monoplateau (expérience décrite dans le document d'accompagnement du cycle central).



Observation : la masse du solide augmente.

Expérience 2

Voir dessin page précédente.

Remarque: l'expérience peut être réalisée dans un flacon d'air mais elle est nettement plus spectaculaire dans le dioxygène. Le bocal est rempli de dioxygène (à la bouteille, par simple déplacement).

L'inflammation de la paille de fer est provoquée en reliant les fils dénudés au générateur par l'intermédiaire des deux cordons (veiller à ce que la paille de fer ne touche pas l'isolant des fils électriques qui risquerait de s'enflammer ! Disposer une couche de sable au fond du flacon pour éviter sa fêlure par l'oxyde incandescent. Opérer derrière un écran de protection, à cause des risques de bris de flacon).

L'extrémité du tuyau plongeant dans l'eau est obturée, par un bouchon adapté (ou par une pince genre pince de Mohr si le tuyau est assez souple), tout le temps que dure la combustion et même au-delà (1 à 2 minutes); ensuite, seulement, ce bouchon est retiré, sous l'eau, et l'on observe que l'eau est aspirée. Si l'on n'utilise pas de bouchon, l'expérience n'est pas probante, car dans ce cas du dioxygène se dégage par le tuyau dans le bécher, dès le début de la combustion, à cause de la dilatation provoquée par l'augmentation de température : l'aspiration d'eau qui se produit ensuite, dès que le flacon se refroidit, ne prouve donc pas que du dioxygène a effectivement été consommé.

• Observations

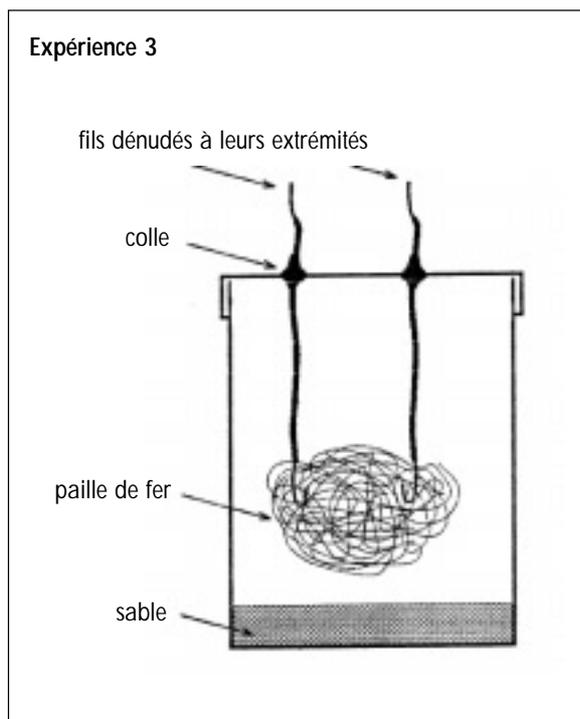
- La combustion est plus vive que dans l'air (expérience 1);
- de l'eau est aspirée (voir la remarque ci-dessus).

• Conclusion

Du dioxygène est consommé au cours de la réaction.

Expérience 3

Le bocal est rempli de dioxygène par déplacement.



L'expérience est réalisée sur le plateau de la balance préalablement équilibrée.

• Observation

Après combustion, la balance reste équilibrée.

• Conclusion

Les résultats de l'expérience, compte tenu de la précision de la balance, ne sont pas en contradiction avec la conservation de la masse affirmée en tant que principe dans le programme.

Conclusion générale

La masse du solide a augmenté (expérience 1), le volume (donc la masse) du dioxygène a diminué (expérience 2), mais la masse totale est constante (expérience 3).

C. Les matériaux dans l'environnement

E3. L'électrolyse à anode soluble

Manipulation

Elèves.

Objectifs généraux

- Respecter un protocole. Réaliser un circuit électrique en respectant rigoureusement le sens de branchement.
- Manipuler proprement.
- Faire un compte rendu rédigé en utilisant la technique du schéma narratif.

Objectifs spécifiques

Réaliser une expérience électrochimique illustrant un procédé industriel de purification d'un métal (voir fiche C4 page suivante).

Matériel

- Une cuve parallélépipédique en plexiglas ou autre matière plastique transparente.
- Une solution de sulfate de cuivre à 100 g/L.
- Une mince feuille de cuivre (épaisseur : 0,5 mm et de dimensions 10 cm x 5 cm).
- Une plaque d'inco dimensions 10 cm x 5 cm, ou une tige de graphite.
- Un générateur 12 V=.
- Un multimètre.

Déroulement de la manipulation

Après avoir réalisé le montage, il suffit d'alimenter l'électrolyseur ; le milliampèremètre permet de déceler le passage d'un courant électrique qui s'accompagne assez rapidement d'un dépôt sur la cathode en inox (ou en graphite). Après une dizaine de minutes, la partie immergée de la feuille de cuivre est entièrement attaquée, la circulation du courant électrique s'interrompt. La mince pellicule de cuivre qui s'est déposée sur la cathode est facilement récupérable sur une électrode en inox (après séchage).

La comparaison entre l'état initial et l'état final permet de

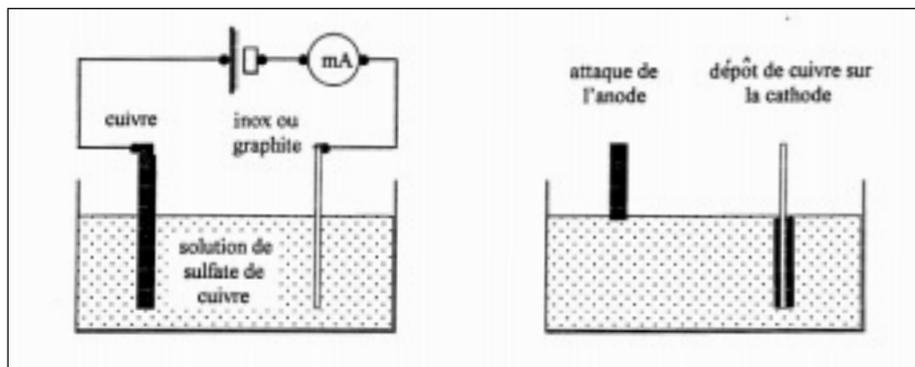


montrer la disparition du cuivre à l'anode (anode soluble) ainsi que le dépôt de cuivre à la cathode. La pesée des électrodes sèches avant et après électrolyse met bien en évidence les phénomènes au niveau des électrodes.

Manipulations complémentaires

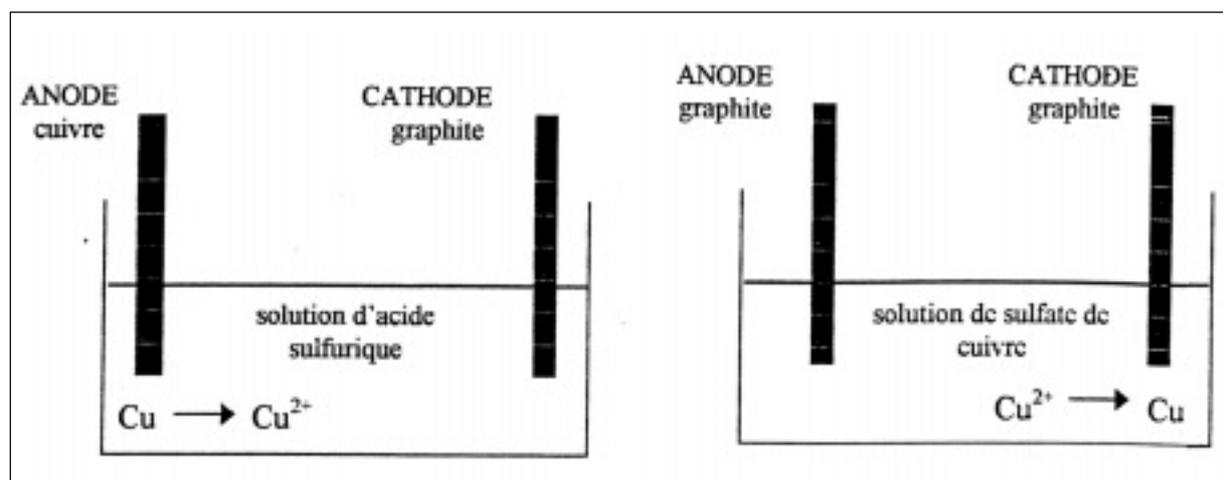
Deux expériences permettent une meilleure compréhension des phénomènes qui se produisent au niveau de chaque électrode :

- en prenant un autre électrolyte (solution d'acide sulfurique diluée), on observe l'apparition de la coloration bleue caractéristique des ions cuivre au niveau de l'anode (expérience a) ;
- l'utilisation de deux électrodes en graphite permet aussi



d'obtenir un dépôt de cuivre à la cathode ; ce qui prouve que le cuivre formé sur la cathode ne peut avoir comme origine que l'électrolyte.

Ces deux expériences s'accompagnent de dégagements gazeux aux deux autres électrodes qu'il n'est pas possible d'expliquer au niveau du collège.



C4. Affinage électrolytique du cuivre

Le cuivre obtenu par traitement métallurgique n'étant pas assez pur, il est nécessaire d'avoir recours à un procédé électrochimique pour le purifier en éliminant d'autres métaux (fer, nickel, or, argent, platine). Cf. l'électrolyse à anode soluble (voir fiche E3).

La cuve à électrolyse contient une solution de sulfate de cuivre et d'acide sulfurique dans laquelle alternent des plaques de cuivre à affiner et des feuilles de cuivre très pur. Le cuivre des cathodes est ensuite fondu pour être utilisé soit sous forme de fils et câbles électriques, soit sous forme d'alliages avec le zinc (laitons), avec l'étain (bronzes), etc.

La fusion par d'autres procédés permet aussi d'obtenir du cuivre à haute conductibilité électrique (présence d'oxygène) ou du cuivre apte aux déformations et au soudage (désoxydation au phosphore).

Le bilan est donc un transfert de cuivre de l'anode à la cathode par la circulation d'ions cuivre dans la solution. Le cuivre obtenu à la cathode est purifié car les impuretés restent dans la solution ou dans les boues.

À tout moment, la perte de la masse de cuivre à l'anode est égale à l'augmentation de masse de cuivre à la cathode (voir p. 33).

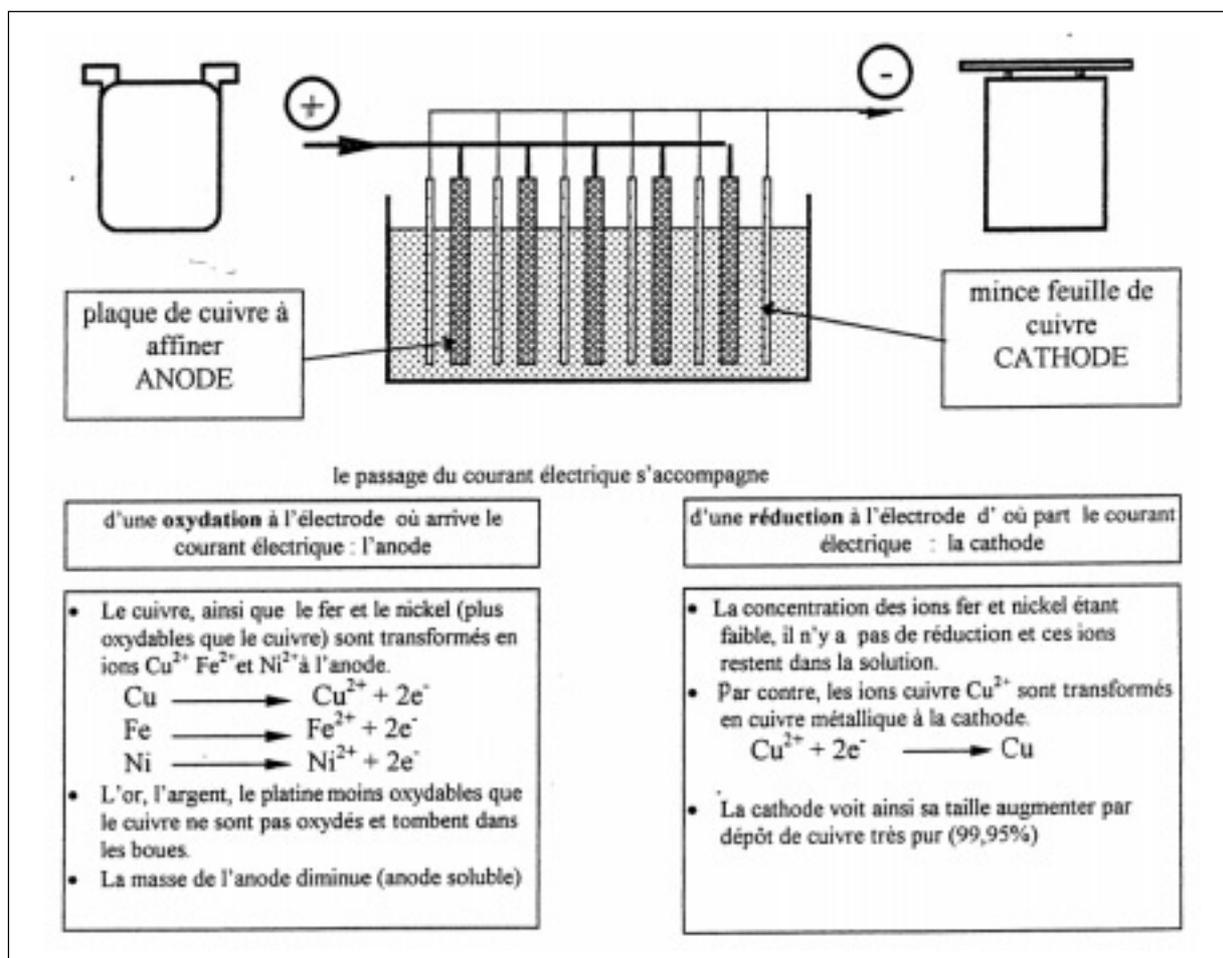
Traitement métallurgique des minerais de cuivre et du cuivre recyclé

Le cuivre est un métal très utilisé, soit à l'état pur, soit sous forme d'alliages (laitons-bronzes, etc.). Il est obtenu à partir de minerais et par recyclage (environ 30%). Le blister¹⁴ minier (98 à 99,5% de cuivre) et le blister de recyclage (97 à 98% de cuivre) contiennent trop d'impuretés pour être utilisés en métallurgie. Dans un four à réverbère¹⁵, ils sont donc d'abord fondus. Le bain métallique obtenu est soumis ensuite à une

14. Le minerai de cuivre est concassé, trié, puis enrichi par flottation ; des traitements thermiques dans un four à réverbère puis dans un convertisseur donnent un produit : le blister, contenant environ 98% de cuivre. Le blister de recyclage des laitons, bronzes, etc., est obtenu par traitements thermiques dans un four à arc électrique et dans un convertisseur.

15. Dans un four à réverbère, la chaleur provenant de la combustion de brûleurs à gaz est rayonnée par la voûte du four.





opération de soufflage avec de l'air enrichi en dioxygène, ce qui permet d'éliminer¹⁶ une grande partie du fer, du zinc et du plomb. Le métal en fusion est alors coulé dans des moules ; les plaques obtenues vont constituer les anodes d'un électrolyseur à anode soluble. Elles contiennent encore des métaux difficiles à oxyder (nickel, or, argent, platine, etc.). Pour les éliminer, on réalise une électrolyse dite « à anode soluble », l'anode étant la plaque de cuivre à affiner.

Texte élève sur le déroulement de l'électrolyse

Pour réaliser l'affinage électrolytique des plaques de cuivre impur (contenant d'autres métaux : fer, nickel, or, argent), il faut mettre en œuvre une électrolyse. Dans une cuve contenant une solution de sulfate de cuivre et d'acide sulfurique, 23 plaques de ce cuivre impur sont plongées entre 24 feuilles de cuivre pur minces. Entre les plaques et les feuilles disposées ainsi parallèlement, il ne doit y avoir aucun contact. Ces plaques et ces feuilles constituent les électrodes plongeant dans la solution d'électrolyte.

Les parties supérieures des plaques sont reliées à la borne positive de l'alimentation : le courant électrique entrera donc par ces plaques ; ce sont les anodes.

les parties supérieures des feuilles sont reliées à la borne négative de l'alimentation : le courant électrique sortira donc par ces feuilles ; ce sont les cathodes.

Une tension de 0,3 V est maintenue entre les anodes et les

cathodes. Un courant électrique assez important traverse le circuit électrique (240 A par m² de surface d'électrode) et son passage s'accompagne :

- de l'attaque de chaque plaque de cuivre impur (235 kg) à l'anode (d'où l'appellation d'électrolyse à anode soluble) ;
- d'un dépôt de cuivre très pur sur les feuilles à la cathode ;
- et de la formation de boues composées de métaux rares (or, argent, platine) alors que la solution d'électrolyte s'enrichit en ions nickel.

Cette opération d'électrolyse dure 18 jours et le meilleur rendement est obtenu en maintenant le bain à une température de 60 °C.

C5. Matériaux et environnement

Le thème des matériaux, et plus particulièrement la partie C du programme de la classe de 3^e, est l'occasion d'aborder les questions de tri et de recyclage. Le présent texte propose

- un rappel très succinct de quelques chiffres-clés ;
- un exemple de travail sur document ;
- d'autres suggestions d'activités ;
- quelques références pour la documentation.

16. Les oxydes de zinc et de plomb sont éliminés dans les fumées (puis récupérés pour leur recyclage). De la silice est ajoutée au bain pour former des scories avec les oxydes de fer (élimination par écumage).



Quelques chiffres-clés¹⁷

L'utilisation, dans la vie courante, d'une très grande variété d'objets fabriqués dans des matériaux divers entraîne une production importante de déchets solides (ordures ménagères, objets hors d'usage comme les voitures), de déchets industriels.

Plus le niveau de vie est élevé, plus la quantité de déchets est importante, celle des déchets non biodégradables comme celle des déchets traités et réutilisés : les 17 millions d'habitants de la Floride en produisent autant que la France entière. Les déchets ménagers ne forment qu'une faible partie du total des déchets d'un pays industrialisé comme la France (environ un vingtième), mais ils représentent près d'un kilogramme par jour et par habitant.

Pour être plus précis, la France produit chaque année 580 millions de tonnes (Mt) de déchets, soit environ 10 tonnes par an et par habitant ou, si l'on préfère, près de 30 kg par jour et par habitant ! Sur ce total, il y a 400 Mt de déchets agricoles, 150 Mt de déchets industriels, et 30 Mt de déchets municipaux. Bien que ces derniers représentent relativement la plus faible masse, ce sont effectivement eux qui concernent le plus directement le citoyen, et donc l'élève.

Les ordures ménagères représentent actuellement 22,5 Mt et les encombrants 7 Mt. Il s'y ajoute les déchets liés à l'automobile (huiles, pneus, batteries). Les ordures ménagères¹⁸ se répartissent en masse de la façon suivante :

- poussières, éléments fins et divers : 15 % ;
- textiles : 2 % ;
- verres : 12 % ;
- métaux : 6 % ;
- matières plastiques : 10 % ;
- papiers et cartons : 30 % ;
- matières putrescibles : 25 %.

Environ 45 millions de Français vivent dans une commune qui pratique, sous une forme ou sous une autre, une collecte sélective.

Les déchets peuvent être :

- recyclés : c'est le cas actuellement des métaux, du verre, des papiers et cartons ;
- brûlés avec valorisation énergétique pour produire soit de la vapeur pour le chauffage urbain (comme à Paris), soit de l'électricité ;
- brûlés sans valorisation énergétique ;
- valorisés par tri et compostage ;
- stockés en décharge.

À titre d'exemple, les économies d'énergie liées à la valorisation énergétique des déchets ménagers ont évolué de la façon suivante : 356 000 tep (tonnes équivalent pétrole) en 1985, 430 000 tep en 1989, 500 000 tep en 1991.

Un exemple de travail sur document : le cycle du verre

• Élaboration

Le verre est élaboré à partir d'un mélange de sable, de calcaire, de chaux ou par récupération de débris de verre

triés par teintes et broyés pour être transformés en matière vitrifiable (les calcins).

• Fabrication des objets

Les matières premières sont fondues à une température voisine de 1 550 °C. La fusion est suivie de l'affinage qui permet d'éliminer les bulles, puis d'une autre opération, « la braise », qui permet de ramener le verre à la température du façonnage, opération effectuée pendant qu'il est encore plastique. Des tensions, rendant le verre fragile, peuvent apparaître au cours du refroidissement ultérieur; elles sont supprimées par la recuisson (chauffage à température modérée, vers 500 °C).

• Récupération

Les bouteilles vides sont collectées dans des conteneurs spécialisés. Elles sont triées pour éliminer les matériaux indésirables (plastiques, capsules métalliques, bouchons, etc.). Le reste est lavé, broyé en petits morceaux. On procède alors à d'autres tris : magnétique pour les débris ferreux, par aspiration pour les débris légers. On a obtenu le calcin, prêt pour une nouvelle fabrication de verre. Ainsi, on a recyclé, en 1995, 1 400 000 tonnes de verre, dont 640 000 tonnes de verres ménagers, ce qui contribue à la protection de l'environnement.

• Questionnaire

- Quels sont les constituants principaux du verre blanc ? Recherchez leur composition chimique.
- Dans le texte, on dit à propos du verre « qu'il est encore plastique ». Que signifie ici le mot « plastique » ?
- À quelle transformation physique les matières premières du verre sont-elles soumises ?
- On utilise « des verres » qui diffèrent par leur couleur, leur réaction à la chaleur, etc. Recherchez par quels procédés ils sont obtenus.

Autres suggestions d'activités

Il est utile de rappeler que le thème de l'environnement est abordé, par exemple, dans le programme d'éducation civique de la classe de 6^e, rubrique « III - Responsabilité vis-à-vis du cadre de vie et de l'environnement ». Certaines actions pédagogiques relatives au thème des déchets ont donc pu être déjà menées par nos collègues de cette discipline à ce niveau. Il est bien évident que le professeur de physique-chimie a, en classe de 3^e, l'opportunité de revenir de façon approfondie sur cet aspect important de l'éducation du citoyen.

Outre le travail de documentation spécifique à la physique-chimie (recherche et compréhension des termes techniques, analyse sur des critères objectifs des différents modes de tri), des activités interdisciplinaires intéressantes peuvent être menées dans différentes directions ; par exemple :

- une recherche sur le développement historique des matières plastiques (histoire-géographie) ;

17. Ces statistiques sont celles de 1995.

18. Autrement dit, le contenu moyen d'une poubelle.



- des représentations graphiques, sous forme de « camembert » ou autre, des données statistiques ;
- une étude des différentes responsabilités administratives en ce qui concerne la gestion des déchets (éducation civique) ;
- la visite d'une déchetterie et l'étude de son impact en matière économique et de son impact sur la qualité de l'air (SVT) ;
- l'étude du design et de la décoration des emballages (arts plastiques).

Quelques références pour la documentation

De très nombreux ouvrages existent sur le thème des déchets et de leur gestion. Outre les livres scolaires, il peut être intéressant, par exemple, de consulter le *Quid* (D. et M. Frémy, éd. R. Laffont) qui fournit de nombreuses données statistiques actualisées. Le beau livre *Emballage, Emballages*, édité par la Cité des sciences et de l'industrie, aborde l'ensemble des aspects relatifs à ce thème et fournit un grand nombre de documents utilisables en classe. On peut consulter de nombreux serveurs Minitel à la rubrique déchets, comme 3615 Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), 3615 Batclean (points de collecte des batteries usagées), 3616 Verinfo (recyclage du verre : historique, décrets, adresses), etc.

T1. Étude coordonnée physique-chimie-SVT d'un problème d'environnement

L'intérêt général d'une approche des questions relatives à l'environnement faisant intervenir plusieurs disciplines de façon coordonnée est explicité dans la fiche intitulée « Approche transdisciplinaire de l'environnement » qui clôt la partie « Considérations générales » de ce document d'accompagnement des programmes. Le lecteur est invité à prendre connaissance de cette fiche où sont également décrits des exemples de stratégies possibles.

Rappelons que la rubrique A3 du programme propose des « activités coordonnées faisant intervenir de façon concertée le professeur de SVT et le professeur de physique-chimie, chacun sur un horaire de trois heures ».

Le programme définit le principe d'une telle coordination :

« En début d'année, les deux professeurs choisissent un thème corrélé aux programmes des deux disciplines. Ils conviennent de la répartition de leurs interventions et des dates prévisionnelles de celles-ci. »

Quelques thèmes possibles

Dans l'hypothèse d'une interdisciplinarité physique-chimie – sciences de la vie et de la Terre (deux des disciplines les plus concernées par l'environnement), on peut estimer que six heures environ peuvent être consacrées à l'étude d'un thème :

- les pluies acides ;
- l'effet de serre ;
- l'ozone en haute et basse atmosphère ;
- le recyclage des matériaux...

Dans tous les cas, plutôt que de survoler plusieurs thèmes, il est préférable de n'en retenir qu'un seul et de le traiter plus à fond.

Un exemple de progression : les pluies acides

Les rubriques des programmes de la classe de 3^e faisant référence à ce thème sont :

- en sciences de la vie et de la Terre : responsabilité humaine : santé et environnement (E) ;
- en physique-chimie : composition de l'air (B1), conservation des atomes (B1), réaction chimique (B1), pH (B2), les matériaux dans l'environnement (C3) ;
- en éducation civique : l'environnement (IV).

• Objectifs

- Identifier les causes et les conséquences d'un phénomène concernant l'environnement.
- Discuter des bases scientifiques de la responsabilité humaine quant aux conséquences des activités de l'homme.

• Déroulement des activités

En italique figurent les activités-supports proposées.

Origine des pluies acides

(Une séance en physique-chimie)

Les pluies acides : une solution aqueuse est acide si son pH est inférieur à 7. Une pluie est dite acide si son pH est inférieur à 5,6. Le dioxyde de carbone n'est pas responsable de l'acidité des pluies.

Mesure du pH d'une solution saturée de dioxyde de carbone (par exemple, d'une eau de Perrier) ; le pH est supérieur à 5,6. Les pluies acides résultent de la dissolution de certains gaz ou de la dilution d'aérosols¹⁹.

Les principaux gaz responsables des pluies acides sont le dioxyde de soufre (SO₂) et les oxydes d'azote (NO et NO₂ notés en résumé NO_x).

Certains gaz dissous dans l'eau confèrent à la solution un caractère acide. Le dioxyde de carbone et le dioxyde de soufre dissous dans l'eau donnent des solutions acides

Combustions du carbone et du soufre dans l'air et le dioxygène ; mise en solution des gaz produits ; mesure du pH des solutions obtenues.

Origine des oxydes d'azote et de soufre : ces oxydes proviennent en partie de l'activité humaine.

Combustion de produits pétroliers (gaz naturel, essence, fuel, etc.).

Oxydation du diazote de l'air à haute température (avions, moteurs à explosion...)

Analyse documentaire d'un texte sur les gaz polluants.

- Ces oxydes ont aussi une origine naturelle.

Volcanisme : dégazage du magma (SO₂, NO et NO₂).

Orages : catalyse des réactions entre N₂ et O₂ (NO et NO₂).

Dégradation biologique : bactéries type *Desulfovibrio* (H₂S et DMS²⁰ se transformant en SO₂).

Analyses documentaires diverses.

19. Un aérosol est, au sens strict, une gouttelette en suspension dans l'air ; par extension, il désigne aussi toute suspension de particules colloïdales solides ou liquides.

20. DMS = Diméthyl sulfure ou H₃C-S-CH₃



Circulation des polluants dans l'atmosphère

Les polluants circulent assez rapidement horizontalement, mais très lentement verticalement : ils ont ainsi le temps de se déplacer sur de grandes distances avant de retomber.

Exemple : un polluant mettra typiquement six mois pour gagner la tropopause (12 km d'altitude) ; dans le même temps, il aura largement le temps de faire le tour de la Terre.

Les pluies ne tombent pas forcément sur le lieu de production des oxydes de soufre et d'azote.

Étude d'une carte iso-pH.

Pluies acides et environnement

(Une séance en sciences de la vie et de la Terre)

Influence des pluies acides sur les êtres vivants

– Des perturbations au niveau de la végétation.

Les végétaux chlorophylliens prélèvent leurs aliments minéraux dans le sol par leurs racines et dans l'air par leurs feuilles (rappel de 6^e).

Les eaux des pluies acides pénètrent dans le sol et modifient l'équilibre ionique : les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} qui interviennent dans la nutrition des arbres sont entraînés par lessivage ; les carences en magnésium et calcium sont responsables du dépérissement et du jaunissement des feuilles ou des aiguilles.

L'action conjuguée des pluies acides et de l'ozone en détruisant la couche cireuse protectrice des feuilles et des aiguilles perturbe leur nutrition.

Observation des feuilles ou d'aiguilles endommagées par l'acidité des pluies.

– Des perturbations au niveau de la vie dans les lac.

Un lac est un milieu de vie pour de nombreuses espèces.

L'acidité vient modifier ce milieu et mettre la vie en danger.

Analyse de documents : influence du pH de l'eau sur différentes espèces.

Influence des pluies acides sur les bâtiments

Les roches s'effritent plus ou moins par l'érosion naturelle.

Ce phénomène d'érosion est accéléré par l'acidité de l'atmosphère.

Expérience : action d'un acide sur différentes roches.

Observation de textes et de photos de monuments atteints par « la maladie de la pierre ».

Quelques méthodes pour limiter les pluies acides

(Une séance en physique-chimie et une séance en sciences de la vie et de la Terre)

Désulfuration des combustibles

Analyse d'un document montrant, par exemple, les montagnes de soufre à Lacq.

Diminution des rejets de poussières et particules émises lors des combustions

Étude d'un document sur les filtres et les pièges à particules pour moteurs automobiles.

Transformation chimique des gaz polluants

Étude du principe de fonctionnement d'un pot catalytique transformant les oxydes d'azote en diazote.

Dépollution des rejets industriels gazeux : le stripping

Expérience montrant que le barbotage d'un gaz susceptible d'engendrer une solution aqueuse acide dans une solution basique a un effet neutralisant.

Le chaulage

– Le chaulage des sols

Les ions Ca^{2+} remplacent les ions H^+ et contribuent à neutraliser l'acidité du sol.

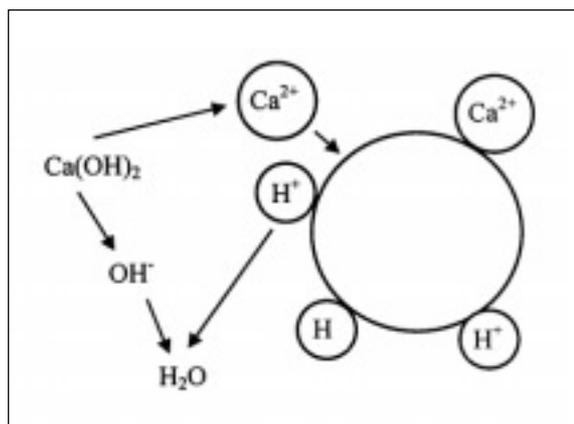
– Le chaulage des lacs

Quand l'eau d'un lac devient trop acide, on peut y déverser du calcaire finement broyé qui neutralise l'acide (inconvenient : ce chaulage peut entraîner des perturbations de l'équilibre de l'écosystème).

Réalisation d'une maquette montrant l'échange des ions Ca^{2+} et H^+ dans le sol (type ci-dessous).

Analyse de textes : intérêt du chaulage dans les étangs de Sologne.

• Conclusion



Les pluies acides ne sont que l'un des aspects de la pollution atmosphérique générée par l'homme.

L'impact des pluies acides sur l'environnement est d'autant plus important que d'autres facteurs s'ajoutent à leur effet : sécheresse, pluviométrie, nature des sols, ozone.

• Évaluation

Un document scientifique permettant un questionnement dans les deux disciplines.

Bibliographie

- François Ramade, *Éléments d'écologie appliquée*, Ediscience.
- Maurice Bonneau, *Courrier de la cellule environnement*, n° 16, avril 1992.
- *Les dossiers de l'INRA*, n° 12, 1996.
- BT n° 981, « Les pluies acides ».
- « Sauvons notre planète », *Les pluies acides*, Éditions Gamma jeunesse.
- Bulletin APBG n° 4, 1986.

Notre environnement physique

A. Mouvements et forces

C6. Le temps, grandeur physique

Les programmes de physique-chimie du collège mentionnent les grandeurs fondamentales de la mécanique (masse, longueur et temps). C'est incontestablement la dernière de ces trois grandeurs qui peut susciter les questions les plus délicates. Le texte qui suit vise à aider le professeur à satisfaire d'éventuelles curiosités²¹.

Parmi les moyens de prendre conscience de l'écoulement du temps, l'observation d'un phénomène répétitif (ou cyclique) tel que l'oscillation du balancier d'une pendule ou l'alternance du jour et de la nuit a un statut particulier. Un tel système auquel on donne le nom général d'horloge permet en effet de mesurer la durée d'un phénomène en comptant le nombre de cycles qui lui correspond.

Un problème qui se pose immédiatement est celui de la concordance des mesures effectuées avec des horloges différentes. Historiquement, le concept implicite de temps universel s'est dégagé progressivement à partir de l'observation suivante : **l'emploi d'horloges fondées sur des phénomènes physiques très différents conduit à une même chronologie cohérente.**

Dès la Protohistoire, les hommes ont ainsi observé qu'une lunaison (cycle complet des phases de la Lune) contient toujours environ 29 jours²² ; il est donc équivalent de définir le temps en adoptant pour « horloge » le jour ou la lunaison²³. Depuis l'Antiquité, l'usage s'est imposé de déduire l'unité de temps du jour en posant :

1 jour = 24 heures²⁴ = 24 x 60 x 60 secondes = 86 400 secondes.

Il a aussi été observé que l'année (cycle des saisons) contient toujours le même nombre de jours (un peu plus de 365). La détermination précise du rapport (année/jour) a été à l'origine des améliorations successives du calendrier (julien, puis grégorien), dont le but est d'éviter que la date calendaire d'un événement astronomique, un solstice par exemple²⁵, ne subisse une lente dérive²⁶.

La possibilité d'utiliser l'année, c'est-à-dire en fait la révolution orbitale de la Terre, en tant qu'horloge est restée à la base de la définition de la seconde jusqu'en 1960.

À cette date, la Conférence générale des poids et mesures a décidé de relier la seconde à des propriétés atomiques. Des considérations de précision qu'il ne saurait être question de discuter au collège ont conduit à la définition qui reste légale et que l'on ne cherchera bien entendu pas à commenter et encore moins à mémoriser : « La seconde est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation électromagnétique correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 ». Cette nouvelle définition avait pour but de mettre à profit la précision accrue permise par les « horloges atomiques », appareil apparu après la Seconde Guerre mondiale. Le

facteur numérique contenu dans la définition a été choisi pour que la durée de 86 400 secondes reste pratiquement égale au jour solaire moyen.

Cette dernière remarque nous conduit à affronter la question la plus délicate : « quand il y a désaccord entre deux horloges, laquelle garder pour définir le temps ? ». La question s'est posée notamment à partir du XVII^e siècle quand on a constaté un « désaccord » entre les « horloges », (1) révolution orbitale annuelle de la Terre autour du Soleil et (2) rotation propre de la Terre autour de l'axe des pôles²⁷ : la durée (2), dite jour sidéral, fluctue et augmente en moyenne de 1,64 milliseconde par siècle seulement !

La raison pour laquelle on a gardé (1) plutôt que (2) comme « bonne horloge » tient au fait que (1) reste, contrairement à (2), en accord avec l'ensemble des autres phénomènes qui peuvent être utilisés pour réaliser des horloges : pendules ou chronomètres mécaniques, oscillateurs électriques²⁸, horloges atomiques...

Par ailleurs, on dispose, dans le cadre de la mécanique newtonienne, d'une explication théorique du « ralentissement » de l'horloge (2), à savoir le « frottement » exercé

21. On s'intéressera seulement à dégager le statut du temps en tant que grandeur mesurable, sans aborder l'irréversibilité de l'écoulement du temps, propriété qui distingue à l'évidence la coordonnée temporelle d'un événement de ses coordonnées spatiales.

22. Plus précisément jours solaires, durée séparant deux culminations du Soleil.

23. De nombreuses langues gardent la trace de l'utilisation de la lunaison en tant qu'unité de temps, les langues indo-européennes notamment désignent le mois et la Lune par des mots fortement apparentés (*month* et *moon* en anglais, *Monat* et *Mond* en allemand, etc.). Le calendrier lunaire est toujours utilisé par les religions juive et musulmane.

24. Depuis la plus Haute Antiquité, les hommes évaluent l'heure de la journée par la place du Soleil dans le ciel, puis par la longueur de l'ombre d'un piquet planté dans le sol (« gnomon »). Les Égyptiens fabriquent ensuite des instruments portables où l'heure est repérée soit par la longueur de l'ombre, soit par sa direction (cadrans solaires). Pour la nuit, les Égyptiens se repèrent sur la position de certaines étoiles. Ils utilisent aussi des horloges à écoulement d'eau, les clepsydres, récipients tronconiques percés d'un trou au fond et gradués intérieurement. La journée et la nuit égyptiennes sont divisées en 12 heures chacune, mais ces heures ont en fait des durées inégales, comme le prouvent les graduations des appareils retrouvés.

25. Le solstice d'été est repérable par deux propriétés : (1) la durée de la journée (définie par la présence du Soleil au dessus de l'horizon) est la plus grande de l'année ; (2) la hauteur du Soleil au moment de sa culmination (midi vrai) est également maximum.

26. Par exemple, la fête chrétienne de Noël, fixée au 25 décembre par le concile de Nicée (325), avait déjà dérivé de 11 jours en 1582, date d'adoption du calendrier grégorien qui reste le nôtre : ceci signifie que l'écart entre Noël et le solstice d'hiver (journée la plus courte), initialement peu sensible, était devenu assez grand pour être noté de tous.

27. La durée correspondante n'est plus le jour solaire, mais le jour sidéral, période de rotation propre de la Terre dans le référentiel de Copernic, voisine de 86 164,090 55 secondes.

28. Les montres actuellement les plus répandues, dites « à quartz », sont construites autour d'un circuit électrique dont la fréquence des oscillations est stabilisée, via le phénomène de piézoélectricité, par un cristal de quartz.



sur la Terre par le bourrelet océanique qui correspond aux marées, source d'une dissipation de l'énergie cinétique de rotation propre de la Terre²⁹.

En conclusion, le temps est fondé en tant que grandeur physique mesurable sur l'ensemble des phénomènes permettant de réaliser des horloges conduisant à une même chronologie cohérente.

C7. Les forces

Le but visé par ce texte est :

- une formulation « naïve » des lois de la dynamique ;
- une illustration simple d'applications avec une restriction au mouvement de translation d'un solide ou au mouvement du centre d'inertie de celui-ci.

Dans le souci de présenter le sujet de façon cohérente, ce texte destiné aux professeurs évoque la troisième loi de Newton (ou principe des actions réciproques) qui est en dehors du programme.

Comment s'énoncent les lois du mouvement ?

• **Pour Newton**, dans *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* (traduction établie par Marie-Françoise Biarnais, Christian Bourgeois éditeur, 1985), ces lois s'écrivaient :

– Loi I : « Tout corps persévère en son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, sauf si des forces "imprimées" le contraignent d'en changer. » ;

– Loi II : « Le changement de mouvement est proportionnel à la force motrice imprimée et s'effectue suivant la droite par laquelle cette force est imprimée. » ;

– Loi III : « La réaction est toujours contraire et égale à l'action : ou encore les actions que deux corps exercent l'un sur l'autre sont toujours égales et dirigées en sens contraire. »

• **Aujourd'hui**, pour les élèves de terminale, ces lois s'énoncent :

– Loi de Newton (Principe de l'inertie) : il existe des référentiels appelés galiléens par rapport auxquels le centre d'inertie G d'un système isolé est soit au repos soit animé d'un mouvement rectiligne et uniforme ;

– Loi de Newton (Théorème du centre d'inertie) : dans un référentiel galiléen, la somme des forces extérieures appliquées à un système est égale au produit de la masse du solide par l'accélération de son centre d'inertie ;

– Loi de Newton (Principe des actions réciproques) : lorsqu'un corps A exerce sur un corps B une action mécanique caractérisée par une force $F_{A/B}$, le corps B exerce sur le corps A une action caractérisée par une force $F_{B/A}$. Que les corps soient au repos ou en mouvement, on a : $F_{A/B} = - F_{B/A}$.

29. Depuis une dizaine d'années, on est en mesure de suivre les variations de la durée du jour sidéral « au jour le jour ». Cette durée fluctue notamment au rythme de saisons et est également affectée par des phénomènes météorologiques tels que le déplacement d'une zone de hautes pressions. Le principe de l'explication de ces variations réside dans la conservation du moment cinétique $J\omega$ et donc des modifications de la durée $T=2\pi/\omega$ engendrées par tout phénomène qui modifie la répartition des masses sur la Terre et donc son moment d'inertie J par rapport à l'axe des pôles.

• **En tentant une formulation qualitative et familière** adaptée au langage des élèves du collège :

– Loi I : « Si je ne fais rien, il ne se passe rien ! » ;

– Loi II : « Si j'agis sur l'objet, sa vitesse peut être modifiée mais aussi sa trajectoire ! » ;

– Loi III : « Si j'agis sur un objet A alors l'objet A agit sur moi ! ».

Importance d'une expression rigoureuse

On parle du mouvement, oui mais de quoi ? Il faut définir le système étudié, ici un objet supposé indéformable et qui doit être spécifié.

On parle du mouvement d'un objet, oui mais par rapport à quoi ? Il faut définir le solide (l'objet ou l'espace) de référence.

Disposant maintenant d'un solide de référence, on peut définir le mouvement d'un objet, une trajectoire, le sens du mouvement, la vitesse...

Comment modifier le mouvement d'un objet ?

Ayant défini l'objet d'étude (supposé indéformable), ayant défini un solide de référence, j'agis (ou un autre objet agit). Je constate une modification :

– de la vitesse,

– de la trajectoire.

Alors je cherche à représenter (en écrivant systématiquement : action exercée, « par qui ? », « sur quoi ? ») l'action qui est à l'origine de cette modification par :

– une direction,

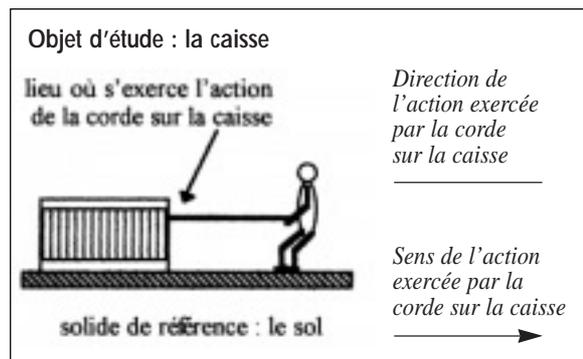
– un sens,

– une « intensité » (la mesure est donnée par l'indication d'un dynamomètre).

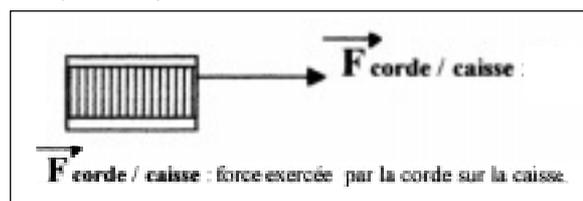
La convention de représentation est un segment fléché.

Exemples

Mise en mouvement d'une caisse

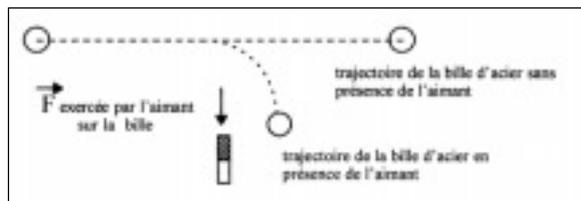


L'action exercée est responsable de la variation de la vitesse. « Plus l'action est forte », plus l'indication du dynamomètre est grande et plus l'acquisition d'une certaine vitesse à partir du repos est rapide. En schématisant :



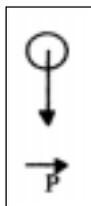
«Modification de la trajectoire»... et de la vitesse

On compare deux situations différentes :
avec ou sans aimant.



La Terre aussi modifie la vitesse

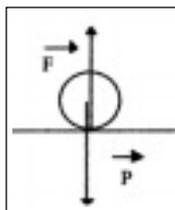
On lâche une balle, elle acquiert une vitesse ; une force est responsable de ce passage de l'état de repos au mouvement par rapport au sol. C'est la force exercée par la Terre sur la balle : elle est ici confondue avec le poids de celle-ci. Le poids est représenté par un segment fléché appliqué au centre de gravité de la balle.



Sa mesure est donnée par l'indication du dynamomètre auquel on a suspendu l'objet.

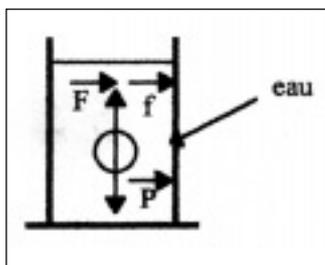
Mais si la balle est posée sur le sol horizontal

Elle subit l'action à distance de la Terre (le poids) et l'action de contact du sol. Si l'objet est immobile : ces deux forces, qui s'exercent sur le même objet, se compensent.



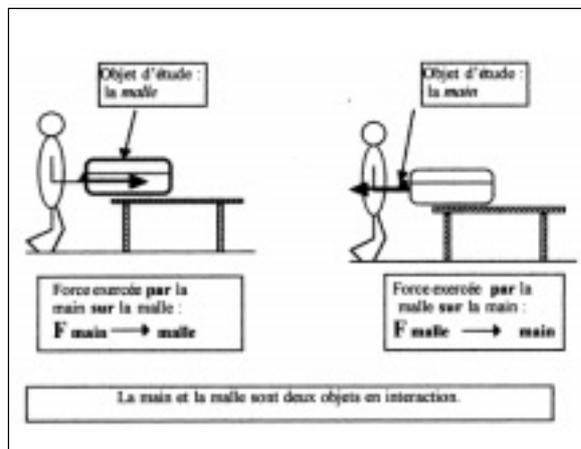
Ou si la balle, chutant dans un récipient rempli d'eau, a atteint sa vitesse limite

La vitesse de la balle est constante : elle subit l'action à distance de la Terre (le poids), la poussée d'Archimède et la force de frottement exercée par l'eau : ces trois forces verticales se compensent.

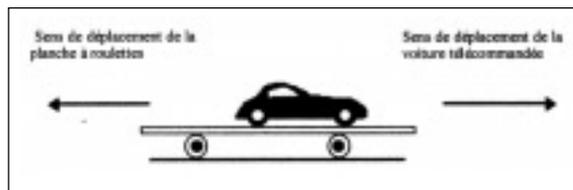


• Des objets en interaction

Au repos



En mouvement



La mise en mouvement de la voiture s'accompagne de la mise en mouvement de la planche.

La planche exerce une action sur la voiture :

F planche → voiture ; cette action de la planche est responsable de la mise en mouvement de la voiture.

La voiture exerce une action sur la planche :

F voiture → planche ; cette action de la voiture est responsable de la mise en mouvement de la planche.

Complément sur la représentation des actions entre objets

L'action main → malle est représentée sur la figure intitulée « Au repos » par une flèche dont l'orientation indique le sens de l'effort exercé et dont l'origine est placée dans la zone de localisation de l'action main → malle.

Réciproquement, l'action, elle aussi localisée, de la malle sur la main est représentée par une flèche appliquée au même point, orientée en sens inverse et de même longueur pour schématiser la relation : $F_{\text{main} \rightarrow \text{malle}} = - F_{\text{malle} \rightarrow \text{main}}$.

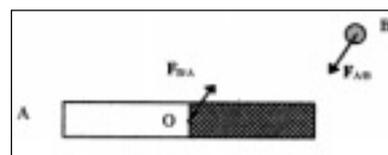
Dans cette situation et dans les situations analogues où il y a un contact entre les objets interagissant, les actions $F_{B/A}$ et $F_{A/B}$ sont représentées par deux flèches opposées, ayant une origine commune située au point de contact.

Pour des actions à distance (forces de gravitation, forces magnétiques, forces électriques, etc.), la représentation sur un dessin des effets exercés par un objet sur un autre est plus délicate car les forces correspondantes sont souvent distribuées en volume.

Pour un petit objet, on pourra représenter la force totale par une flèche dont l'origine est attachée à l'objet, qui est alors considéré comme « ponctuel ». C'est le cas de la petite bille en interaction avec l'aimant.

Pour un objet volumineux, la force totale subie peut être représentée par une flèche, mais en général il n'y a pas de point particulier du système où l'attacher. Sur la figure ci-dessous la flèche a été fixée en O « centre » de l'aimant, mais ce choix est totalement arbitraire. Noter que les flèches $F_{B/A}$ et $F_{A/B}$ sont opposées mais ne sont pas colinéaires. Cela est dû au fait que la description de l'action bille → aimant par une force unique (appliquée par exemple en O) est insuffisante ; l'aimant a tendance à pivoter, ce qui montre bien que la description doit être complétée.

L'analyse précédente montre, pour les effets d'une force, l'importance de son point d'application. La modélisation d'une action ne peut être réduite à l'objet mathématique « vecteur ».



B. Électricité et vie quotidienne

D2. Démarches expérimentales relatives à la résistance électrique

La résistance électrique est une grandeur essentielle en tant que critère pour le choix des matériaux utilisés en électricité. La notion de résistance permet également de caractériser un circuit série par une grandeur et permet ainsi, à côté des propriétés de l'intensité et de la tension, d'avoir une vue plus globale de son comportement. Une meilleure compréhension des conditions d'utilisation de certains composants (DEL) est ainsi facilitée. La mesure de la résistance des fils souples

utilisés pour les montages permettra de vérifier leur état et ainsi de détecter certains défauts.

L'étude de la résistance permet le développement de démarches expérimentales nécessitant la mise en œuvre de manipulations à la fois simples et rapides, utilisant toutes les mesures de grandeurs électriques rencontrées au collège, avec des composants familiers déjà utilisés en technologie (résistors³⁰, DEL).

L'étude qui suit se situe en courant continu. Certains résultats tels que l'additivité des tensions s'étendent en alternatif aux valeurs efficaces à condition que le circuit ne comporte que des éléments purement résistifs.

Schéma de la démarche pédagogique expérimentale proposée

	Compétences
Situation problème	<ul style="list-style-type: none"> – Exprimer la situation concrète en utilisant le langage scientifique adapté au niveau de la classe.
Formulation d'hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> – Identifier les différents paramètres. – Exprimer les hypothèses sous une forme précisant bien le paramètre (cause) qui aurait un effet sur la grandeur (conséquence).
Vérification expérimentale des hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> – Exprimer sous forme d'une phrase l'acte expérimental : « je fais varier... (la cause)..., je mesure... (la conséquence)... ». – Ne faire varier qu'un seul des paramètres à la fois. – Représenter graphiquement (tableau-graphe). – Donner un titre sous la forme: étude ou variation de... (conséquence)... en fonction de... (cause)...
Analyse des résultats	<ul style="list-style-type: none"> – Identifier des grandeurs proportionnelles et des grandeurs qui ne le sont pas. – Exprimer chaque résultat sous forme d'une phrase montrant l'influence du paramètre (cause) sur la grandeur (conséquence). Utilisation des liens logiques. – Savoir exprimer une relation de proportionnalité : la formulation « la résistance du fil électrique est proportionnelle à sa longueur » est préférable à « ces grandeurs sont proportionnelles » qui ne met pas en évidence le paramètre « cause ».
Réponse au problème	<ul style="list-style-type: none"> – Sélectionner parmi les résultats ceux qui permettent d'apporter une réponse au problème posé. – Montrer que certains résultats peuvent apporter une réponse à d'autres problèmes.

Influence d'un résistor ajouté en série dans un circuit électrique

	Compétences
Situation problème	<ul style="list-style-type: none"> – Que modifie un résistor ajouté en série dans un circuit électrique ? – Pourquoi utiliser une « résistance de protection » avec une DEL ? – Pourquoi ce mot « résistance » ?

30. Dans le texte qui suit, on utilisera le mot « résistor » dans des phrases où il convient de distinguer le composant de la grandeur qui le caractérise. Selon l'usage courant, le composant peut aussi bien être désigné sous le nom de « résistance » quand il n'y a pas de risque de confusion.



Formulation d'hypothèses (H)	Le fonctionnement du circuit électrique (intensité-tension) dépend : <ul style="list-style-type: none"> - H1 : du sens de branchement du résistor ; - H2 : de la place du résistor dans le circuit électrique ; - H3 : de la valeur de la résistance du résistor.
Vérification expérimentale des hypothèses	Dans un circuit simple avec une lampe éclairant normalement (tension d'usage adaptée à celle du générateur), on introduit, en série : <ul style="list-style-type: none"> - H1 : un résistor dont on inversera le sens de branchement ; - H2 : un résistor que l'on placera soit en « amont » soit en « aval » de la lampe ; - H3 : des résistors de résistances différentes. <p>Dans chaque cas, on mesure l'intensité dans le circuit électrique, la tension aux bornes du générateur, de la lampe, de la résistance.</p>
Analyse des résultats	Un résistor : <ul style="list-style-type: none"> - n'a pas de sens de branchement ; - peut être placé en n'importe quel point du circuit série ; - provoque la diminution de l'intensité dans le circuit et un éclairage plus faible de la lampe ; l'intensité est d'autant plus faible que la résistance du résistor ajouté est grande ; - la tension délivrée par le générateur se répartit entre la lampe et le résistor (additivité des tensions) mais cette répartition varie avec la valeur de la résistance : la tension aux bornes du résistor augmentant avec la valeur de la résistance, la tension aux bornes de la lampe diminue et ne permet plus une bonne utilisation.
Réponse au problème	<ul style="list-style-type: none"> - Un résistor ajouté en série dans un circuit électrique provoque la diminution de l'intensité dans le circuit et la diminution de la tension aux bornes de la lampe. <p><i>Remarque</i> : il sera possible de mesurer la tension aux bornes d'une DEL en série avec un résistor ainsi que l'intensité du courant qui la traverse pour vérifier que ce composant est ainsi alimenté correctement.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Le résistor « gêne » le passage du courant électrique, il « résiste ».

Loi d'Ohm pour un résistor

	Compétences
Situation problème	Existe-t-il une relation entre la tension aux bornes d'un résistor et l'intensité du courant qui le traverse ?
Formulation d'hypothèses	La tension aux bornes d'un résistor dépend de l'intensité du courant qui le traverse.
Vérification expérimentale des hypothèses	Pour différentes valeurs de l'intensité du courant qui traverse un résistor de valeur connue (conducteur ohmique), mesurer la tension aux bornes de ce résistor.
Analyse des résultats	<ul style="list-style-type: none"> - La tension croît si l'intensité augmente. - La tension est proportionnelle à l'intensité. - Le rapport de proportionnalité $U(V)/I(A)$ a même valeur que la résistance du résistor. - La caractéristique est une droite passant par l'origine.
Réponse au problème	La tension (en volts) aux bornes d'un résistor (ohmique) est proportionnelle à l'intensité du courant qui le traverse.



Comparaison de la résistance de différents conducteurs

	Compétences
Situation problème	De quels facteurs peut dépendre la résistance d'un fil conducteur métallique cylindrique ?
Formulation d'hypothèses (H)	La résistance d'un fil conducteur cylindrique peut dépendre : – H1 : du matériau (métal ou alliage) ; – H2 : de sa longueur ; – H3 : de son diamètre (ou de sa section).
Vérification expérimentale des hypothèses	Comparer les valeurs de résistances : – H1 : de fils de même longueur, de même diamètre mais en matériaux différents ; – H2 : de fils de même matériau, de même diamètre mais de longueurs différentes ; – H3 : de fils de même matériau, de même longueur mais de diamètres différents.
Analyse des résultats	La résistance d'un fil conducteur cylindrique : – est différente selon le matériau ; – entre deux fils de même matériau, le fil le plus résistant est : le plus long s'ils ont le même diamètre ; le plus fin s'ils ont même longueur ; – est proportionnelle à sa longueur (calcul du rapport et/ou représentation graphique).
Réponse au problème	La résistance d'un fil conducteur cylindrique : – dépend du matériau ; – augmente avec sa longueur ; – diminue avec son diamètre. Applications : – choix d'un matériau de faible résistance comme conducteur ; – choix d'un matériau de forte résistance pour obtenir un fort effet Joule pour une intensité donnée.

E4. Tension alternative très basse fréquence Étude assistée par ordinateur

Introduction

Ce type de manipulation vient compléter celle faisant intervenir le relevé manuel. L'élève doit d'abord être initié à ce dernier et aux tracés graphiques sur papier.

Il faut notamment que ces activités préparatoires aient amené les élèves à comprendre que, sur les graphiques obtenus, l'écoulement du temps est représenté sur l'axe horizontal et une grandeur physique sur l'axe vertical.

Quand on utilise l'ordinateur, il est essentiel de faire comprendre que cet outil n'intervient que pour l'acquisition et le traitement, la mesure proprement dite restant faite par un organe, dit capteur, externe à l'ordinateur.

Dans tous les cas, il faut prendre le temps nécessaire pour que l'élève ait bien compris que ce qui est représenté sur

l'écran résulte d'une série de mesures et non d'une simulation.

Objectifs de la manipulation

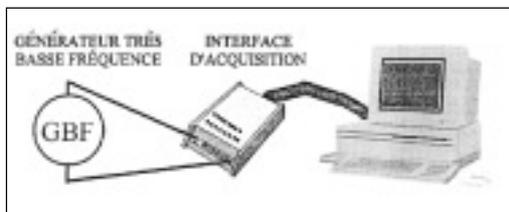
L'emploi de l'ordinateur devient particulièrement intéressant par rapport à deux aspects de la manipulation. Un premier est de montrer l'évolution régulière de la tension ; en effet, le nombre élevé d'acquisitions permet de faire prendre conscience aux élèves de cet aspect du phénomène (un autre moyen de l'illustrer est de s'aider de l'observation à l'oscilloscope de l'évolution au cours du temps de cette tension très basse fréquence).

Le deuxième aspect intéressant apparaît quand on est amené à comparer des acquisitions faites dans des conditions différentes. Par comparaison de graphiques, ceci permettra de mettre en évidence des propriétés caractéristiques que sont la période et la tension maximale de la tension alternative.



Schéma du montage pour le relevé d'une tension alternative très basse fréquence

Il n'y a pas de difficulté particulière dans la réalisation de l'expérience, elle dure le temps de l'acquisition, environ deux à trois minutes dans ces conditions.



Résultats et exploitations

Sur les graphiques ci-contre, on pourra observer trois enregistrements de signaux différents. Les deux premiers relevés ne comportent chacun qu'un signal noté U1 pour le premier et U2 pour le deuxième. Le troisième relevé comporte deux signaux notés U3 et U4, ces derniers ont été enregistrés successivement par le dispositif d'acquisition avec des réglages différents du générateur très basse fréquence. Le système d'exploitation employé permettait de visualiser deux signaux sur le même graphique.

On peut faire observer, en comparant aux relevés « manuels », la plus grande souplesse de l'acquisition informatique, qui va permettre de faire progresser plus loin l'étude d'une tension alternative. En observant les similitudes et les différences entre plusieurs relevés, on pourra dégager quelques caractéristiques supplémentaires de ces tensions.

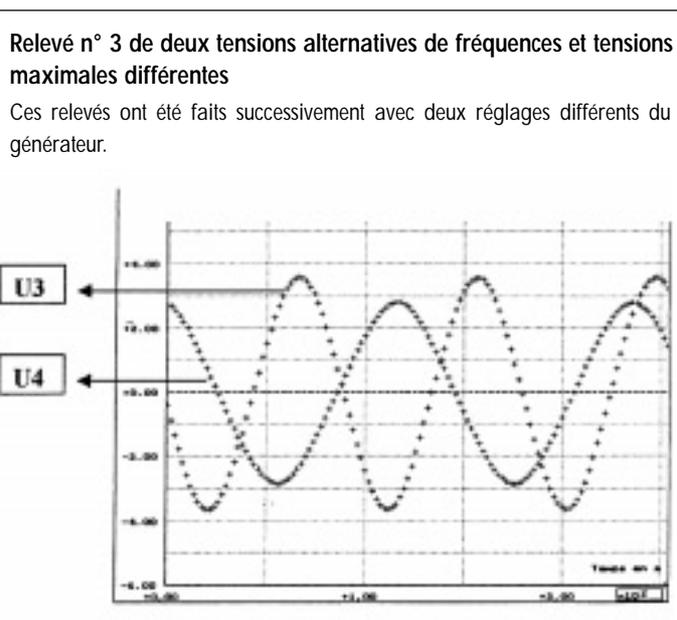
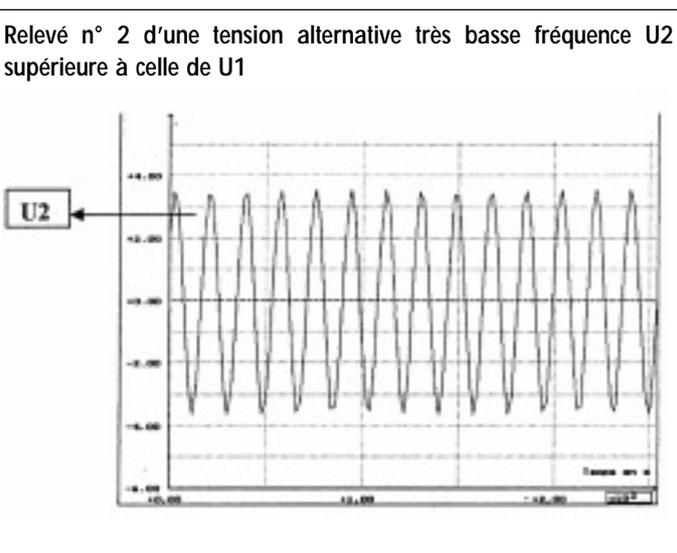
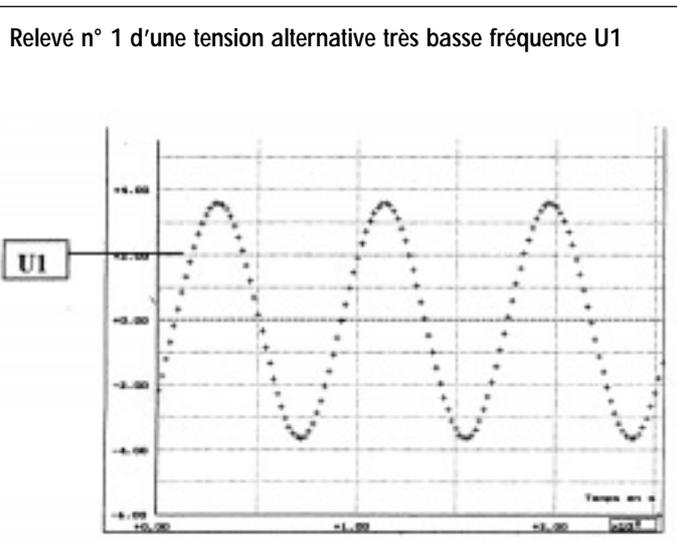
On fera observer l'évolution régulière des tensions dans les trois relevés (ce qui justifie *a posteriori* la contrainte de lissage imposée par le professeur lors du tracé du graphique des relevés « manuels »).

En observant les relevés n°1 et 2, on fera noter la différence du nombre de « motifs élémentaires » correspondants à une même durée entre les tensions U1 et U2. Ceci fait apparaître la période comme une caractéristique pouvant différencier deux tensions alternatives.

En observant le relevé n°3, on fera noter non seulement la différence de période de U3 et U4, mais aussi celle de leur tension maximale. Cette grandeur est une deuxième caractéristique pouvant distinguer deux tensions alternatives.

On fera déterminer les valeurs de la tension maximale et celles de la période. Par exemple sur le relevé n°3, on trouvera des valeurs de la période pour U3 proche de 90 s, et pour U4 de 120 s. Pour la tension maximale, on aura de même pour U3 une valeur proche de 3,6 V et pour U4 de 2,8 V.

On pourra signaler que la « forme » de cette tension alternative ne varie pas sur les relevés et donner son nom à titre indicatif : tension alternative sinusoïdale.



E5. Redressement d'une tension alternative Étude assistée par ordinateur

Objectifs

Dans la vie quotidienne, les élèves sont amenés à rencontrer des appareils appelés « adaptateurs » permettant, à partir de la tension du secteur, de fournir une tension se rapprochant d'une tension continue. Un rapide démontage permet d'observer les différents éléments intervenant dans ce dispositif, transformateur, pont de diodes, condensateur.

Au cours de cette activité, il s'agira d'observer le rôle plus particulier de deux d'entre eux, le pont de diodes et le condensateur, et donc d'illustrer la fonction de redressement pour le premier et de filtrage pour le second ; on pourra montrer l'influence de la valeur du condensateur sur la qualité du filtrage, si on dispose du matériel adapté.

À partir des montages correspondants aux schémas ci-dessous et ci-contre, on fera l'acquisition des tensions de sortie de chaque élément. On déterminera certaines caractéristiques des signaux pour en déduire la fonction des deux composants étudiés.

On rappelle que le programme ne demande pas de mémoriser le montage du pont de diodes, ni son fonctionnement. *A fortiori*, il ne saurait être question de justifier l'effet du condensateur.

Cette manipulation vient compléter celles que l'on peut faire pour visualiser les changements de sens (emploi de diodes électroluminescentes, de moteurs ou oscilloscope).

Montages

On réalisera les montages correspondants aux schémas 2 et 3, en introduisant au fur et à mesure chaque élément du dispositif de redressement représenté dans le schéma 1. On fera l'acquisition des différents signaux formés sur des voies séparées du dispositif. Ceci permet de les mémoriser pour montrer sur un même graphique l'évolution du signal d'entrée.

La résistance de charge utilisée dans ce montage est une fraction de celle d'une résistance variable de 4,7 k Ω (ceci afin de respecter les contraintes matérielles de l'interface d'acquisition). On prendra soin de veiller aux sens de branchement des différents éléments, plus particulièrement ceux des condensateurs électrochimiques C (risque de claquage).

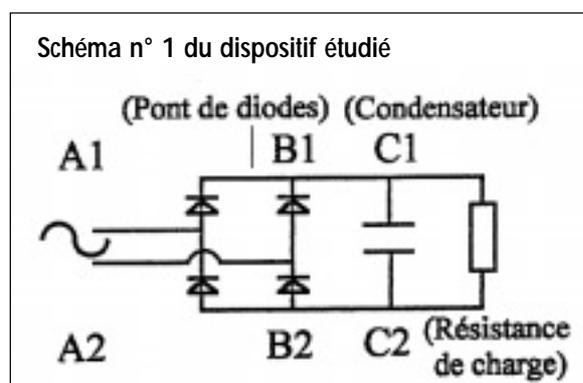


Schéma n° 2 : Rôle du pont de diodes

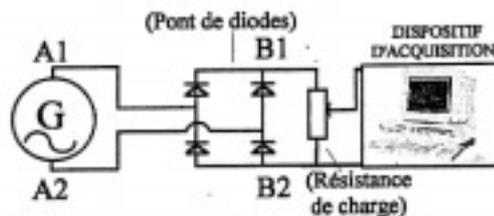
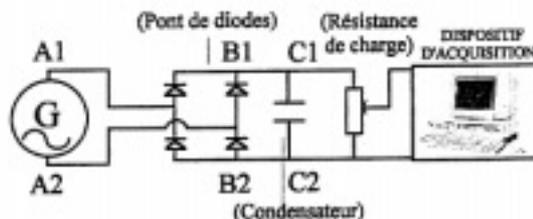
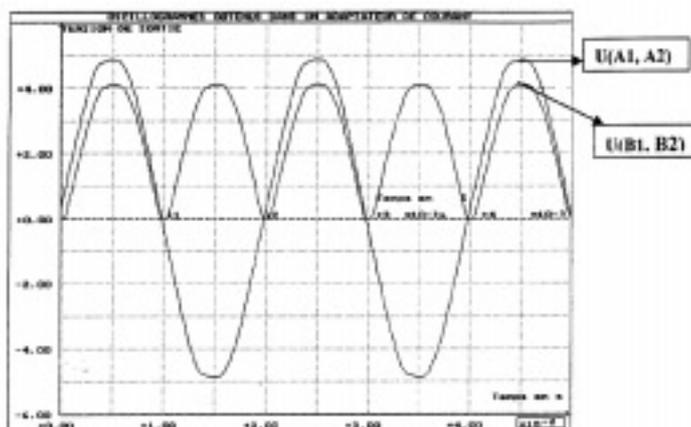


Schéma n° 3 : Rôle du condensateur



Rôle du pont de diodes

Oscillogrammes obtenus dans un adaptateur de courant



Résultats et exploitations

On observe que :

- Le circuit d'entrée est alimenté en A1 et A2 par une tension alternative sinusoïdale $U(A1, A2)$ de période 0,02 s donc de fréquence 50 Hz.

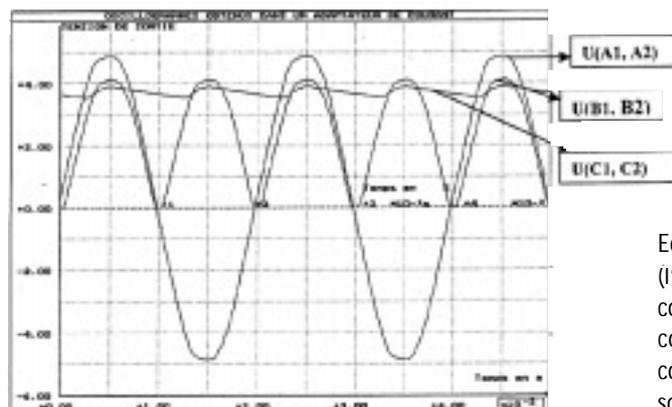
La tension de sortie du pont de diodes $U(B1, B2)$ est une tension positive, toujours de même signe.

Cette tension est de 0,01s. Elle équivaut à la moitié de celle du signal d'entrée.

On peut en conclure que **le pont de diodes permet d'obtenir une tension variable, toujours de même signe**. Elle est appelée tension redressée double alternance.

Rôle du condensateur

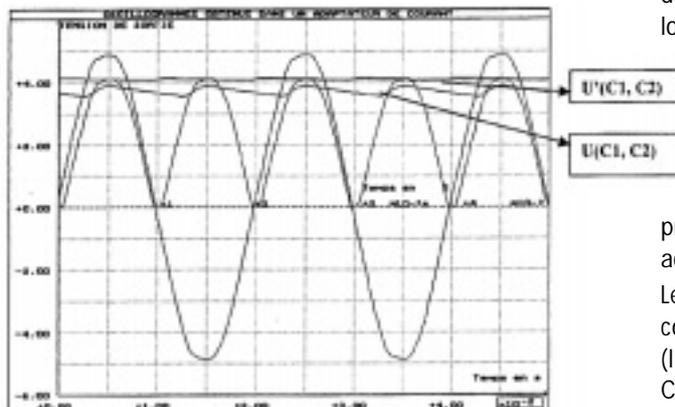
- Condensateur de capacité environ 100 μF



On retrouve sur l'oscillogramme le graphe de la tension d'entrée $U(A1, A2)$, celui de la tension de sortie du pont de diodes $U(B1, B2)$, tensions obtenues et gardées en mémoire par le logiciel lors de la précédente manipulation.

On observe la nouvelle tension $U(C1, C2)$ aux bornes du condensateur. On notera que l'ondulation de la tension redressée est **considérablement réduite**.

- Condensateur de capacité plus forte (environ 1000 μF)



Si on place un condensateur C' de capacité nettement plus forte que celle du cas précédent, on observe le graphe d'une nouvelle tension $U'(C1, C2)$.

On observe que les ondulations de la tension U' ont encore diminué.

On peut en conclure que le rôle du condensateur est de réduire les variations de la tension redressée, cela d'autant plus que sa capacité est importante.

Conclusion

Une tension sensiblement continue est obtenue à partir d'une tension alternative sinusoïdale en associant un redresseur à pont de diodes et un condensateur.

H2. La production industrielle d'électricité

Texte destiné aux professeurs

En 1831, l'Anglais Michael Faraday découvre le phénomène d'induction en déplaçant un aimant par rapport

à un circuit. Dès lors, on sait convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Dès 1832, Ampère fait construire par son compatriote Hippolyte Pixii une machine à manivelle faisant tourner un aimant en U (inducteur) devant deux bobines (induit), produisant ainsi un courant alternatif. Adjoignant ensuite à sa machine un « commutateur d'Ampère », Pixii produit un courant continu.

Différents perfectionnements sont apportés par la suite aux générateurs électriques. Ainsi l'Anglais Edward Clarke construit une machine à induit mobile (l'aimant est fixe). En 1864, l'Italien Antonio Pacinotti conçoit un induit mobile en forme d'anneau doté d'un collecteur. En 1866, l'Allemand Werner von Siemens construit une dynamo dans laquelle les aimants inducteurs sont remplacés par des électroaimants alimentés par la machine elle-même, et l'induit est constitué d'enroulements sur un tambour, disposition toujours adoptée actuellement. En 1871, le Belge Zénobe Gramme fait construire une machine entraînée par un moteur à vapeur, dont on peut dire qu'elle est la première à pouvoir produire industriellement de l'électricité.

On voit que, dès les années 1870, on est capable de **produire** industriellement aussi bien du courant continu que du courant alternatif³¹. Mais la difficulté se situe au niveau du **transport** : la tension chute rapidement à mesure que la longueur de la ligne augmente.

La fin du XIX^e siècle va voir se livrer une lutte sévère entre tenants du courant continu et tenants du courant alternatif pour la production industrielle.

En 1881, une grande exposition est organisée à Paris pour présenter les différents appareils capables de produire, de transporter et d'utiliser l'électricité. Elle accueille près d'un million de visiteurs.

Le Français Marcel Deprez est un partisan du courant continu. Les expériences qu'il mène successivement (liaison La Chapelle-Le Bourget en 1883, puis La Chapelle-Creil en 1885 par exemple) ne donnent pas les résultats escomptés. Pendant ce temps, son compatriote Lucien Gaulard défend le courant alternatif. En 1883, il dépose avec l'Anglais John Dixon Gibbs le brevet d'un appareil qui sera appelé plus tard « transformateur » ; le rendement annoncé est de 90%. Face aux critiques des tenants du courant continu, Gaulard installe avec succès en 1884, à l'occasion de l'exposition d'électricité de Turin, une ligne de 80 km entre Turin et Lanzo. Le **courant alternatif** l'emporte, en France du moins, car, aux États-Unis, le courant continu possède un solide défenseur en la personne d'Edison !

En 1885, l'Italien Galileo Ferraris montre que des courants alternatifs polyphasés peuvent créer un champ magnétique tournant. En 1888, le Croate Nikola Tesla construit sur ce principe un moteur triphasé.

Dans toute l'Europe et aux États-Unis, de nombreux constructeurs se livrent une concurrence sévère dans le

31. À cette époque cependant, la préférence va très nettement au courant continu (la machine de Gramme, par exemple, est à courant continu).



domaine de la construction d'appareils électriques, et en particulier de générateurs.

En 1913, le réseau français de distribution est encore très morcelé : la production est faite par un grand nombre de petites usines, et le courant distribué sur des distances assez faibles ; à cette date, seules 6 000 communes, sur 36 000 environ, sont équipées.

Après la Première Guerre mondiale, commence l'interconnexion des réseaux. En 1920 sont construites les premières lignes reliant la Suisse, l'Italie, l'Allemagne avec la France.

En 1936, la plupart des communes de France reçoivent l'électricité.

En avril 1946, une grande part des usines de production et des réseaux de distribution sont regroupés dans la société nationale électricité de France.

Texte destiné aux élèves

Remarque : en même temps que ce texte, on peut présenter aux élèves différentes illustrations de machines d'époque.

En 1831, l'Anglais Michael Faraday découvre le phénomène d'induction, c'est-à-dire la création d'un courant par un aimant mobile. Dès lors on sait convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Dès 1832, Ampère fait construire par son compatriote Hippolyte Pixii une machine à manivelle faisant tourner un aimant en U (inducteur) devant deux bobines (induit), produisant ainsi un courant alternatif. Adjoignant ensuite à sa machine un « commutateur d'Ampère », Pixii produit un courant continu.

Ensuite, les physiciens améliorent la qualité et la puissance des générateurs électriques. Par exemple, ils remplacent les aimants par des électroaimants : ce sont des bobines parcourues par un courant électrique qui se comportent comme des aimants, mais avec un champ magnétique qui peut être très fort si la bobine comporte beaucoup de spires et si l'intensité du courant est élevée.

En 1871, le Belge Zénobe Gramme fait construire une machine entraînée par un moteur à vapeur, dont on peut dire qu'elle est la première à pouvoir produire industriellement de l'électricité.

En 1881, une grande exposition est organisée à Paris pour présenter les différents appareils capables de produire, de transporter et d'utiliser l'électricité. Elle accueille près d'un million de visiteurs. On y voit aussi bien des générateurs de courant alternatif que des générateurs de courant continu, même si ces derniers ont la faveur des utilisateurs de l'époque (la machine de Gramme, par exemple, est à courant continu). Cependant, tous les constructeurs rencontrent des difficultés importantes pour transporter l'énergie électrique : en effet la tension chute rapidement à mesure que la longueur de la ligne augmente, à cause des pertes par effet Joule.

C'est entre les années 1880 et 1890 qu'est découvert un appareil appelé « transformateur ». Cet appareil, qui ne fonctionne qu'en courant alternatif, permet à volonté d'élever ou d'abaisser la tension électrique. Cela est très intéressant car, pour une énergie transportée donnée, plus la

tension est élevée, plus les pertes par effet Joule sont réduites. Le transformateur assure le succès du courant alternatif face au courant continu.

Le domaine de la construction d'appareils électriques, et en particulier de générateurs, est devenu un enjeu économique majeur : dans toute l'Europe et aux États-Unis, de nombreux constructeurs se livrent une concurrence sévère. C'est au début du XX^e siècle qu'apparaissent sur le marché la plupart des appareils électriques ménagers : grille-pain, fer à repasser, machine à coudre, ventilateur, sonnette, etc.

En 1913, le réseau français de distribution est encore très morcelé : la production est faite par un grand nombre de petites usines, et le courant distribué sur des distances assez faibles ; à cette date, seules 6 000 communes, sur 36 000 environ, sont équipées.

En 1936, la plupart des communes de France reçoivent l'électricité.

En avril 1946, une grande part des usines de production et des réseaux de distribution sont regroupés dans la société nationale électricité de France.

• Questions niveau 1 (réponses dans le texte)

- Quel est l'avantage des électroaimants sur les aimants ?
- Pourquoi le transformateur assure-t-il le succès du courant alternatif face au courant continu ?
- À l'époque de la Première Guerre mondiale, l'électricité était-elle distribuée dans toute la France ?

• Questions niveau 2

(réponses à chercher dans une encyclopédie)

- Combien de temps s'est-il écoulé entre la découverte de la pile par Volta et la mise au point de la machine de Pixii ? (Réponse : pile de Volta en 1800, donc environ trente ans.)
- On nous dit que les générateurs transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. D'où peut provenir cette énergie mécanique ? (Réponse : des chutes d'eau des barrages, ou de la vapeur d'eau dans les centrales thermiques.)
- Quels sont les appareils cités dans le texte qui transforment l'énergie électrique en énergie mécanique ? (Réponse : les appareils comportant un moteur, tels les machines à coudre, les ventilateurs.)
- Parmi les appareils électriques ménagers cités dans le texte, quels sont ceux dans lesquels l'effet Joule est mis à profit ? (Réponse : grille-pain, fer à repasser.)
- Parmi les appareils électriques ménagers cités dans le texte, quels sont ceux dans lesquels l'effet magnétique est mis à profit ? (Réponse : les appareils à moteur déjà cités, les transformateurs, les sonnettes.)

Exemple de source documentaire et iconographique

L'électricité, de l'étincelle à l'électron, Steve Parker, éditions Gallimard, collection « Passion des Sciences ».



H3. L'alimentation électrique des trains et métros : historique

Le texte présenté ici est destiné aux élèves, mais, du fait de son niveau relativement élevé, il sera parfois nécessaire avec certaines classes de n'en retenir que les extraits les plus simples. Par ailleurs ce texte, lorsqu'il est donné aux élèves, est accompagné de gravures ou de photographies qui ne sont pas reproduites ici.

Ce texte permet à la fois un travail spécifique à la physique (réinvestissement des connaissances sur la tension, l'intensité, la puissance et l'énergie électriques) et un travail en liaison avec les collègues d'histoire-géographie.

Les trains

En 1879, l'Allemand Siemens fait à l'exposition de Berlin la première démonstration d'une locomotive électrique. En 1881, il crée les premières lignes de tramway, avec deux rails conducteurs. En France, les premières lignes ferroviaires sont électrifiées dans les années 1900, en banlieue parisienne³². L'alimentation se fait alors en courant continu 600 V, puis 750 V, au moyen d'un troisième rail conducteur. Le courant alternatif, quant à lui, est essayé un peu plus tard, sur la ligne Perpignan-Villefranche-de-Conflent³³, avec une tension de 12 kV et une fréquence de 16 2/3 Hz, alimentation par caténaire³⁴. Cependant, à partir de 1920, c'est la technologie du courant continu, avec alimentation par caténaire, qui tend à s'imposer (et de nombreuses lignes équipées à l'époque avec cette technologie sont toujours actuellement en service). La tension vaut en général 1,5 kV, et cette valeur relativement faible n'est pas sans poser des problèmes. En effet, pour atteindre une puissance électrique de 3 MW, valeur courante pour une motrice de train, il faut des intensités très importantes (de l'ordre de 2 kA). Par suite, la perte en ligne est considérable, sauf à utiliser des câbles de section énorme que les pylônes seraient incapables de supporter. Cette technologie du courant continu nécessite donc de nombreuses sous-stations (tous les 10 km, parfois moins). C'est pourquoi seulement trois très grandes lignes sont ainsi électrifiées en continu (Paris-Le Mans, Paris-Bordeaux, et enfin Paris-Lyon en 1952).

Lorsqu'il est décidé de généraliser l'électrification, dans les années 50, la SNCF opte pour le courant alternatif EDF 50 Hz, à une tension de 25 kV (première ligne équipée : Charleville-Valenciennes, 1954). Pour les motrices les plus courantes (3 MW) et même pour les plus puissantes (5 MW et davantage), l'intensité reste ainsi limitée à une centaine d'ampères, les fils des caténaires sont raisonnablement gros et donc pas trop lourds, et les sous-stations peuvent être espacées d'une cinquantaine de kilomètres ou même plus, ce qui correspond au maillage du réseau haute tension d'EDF³⁵. Les moteurs alternatifs utilisés actuellement pour les trains font appel à diverses technologies, et la concurrence industrielle internationale est rude en ce domaine. Il est à noter que de nombreuses motrices, y compris sur les rames TGV, sont des machines « mixtes » car certaines portions d'une ligne peuvent être en continu et d'autres en alternatif. C'est le cas, par exemple, du TGV Nord (mis en service en 1993), dont chaque rame, composée de deux motrices

« bicourant » et huit remorques, est tractée par huit moteurs « consommant » une puissance totale de 8,8 MW sous 25 kV alternatif, et 3,7 MW sous 1,5 kV continu.

Les TGV de « nouvelle génération », prévus pour une vitesse commerciale de 360 km/h, consommeront 14 MW. Pour pouvoir circuler sur tout le réseau européen, ils seront compatibles avec quinze systèmes d'alimentation différents dont les principaux sont 25 kV en 50 Hz et 15 kV en 16 Hz 2/3 pour l'alternatif, et 1,5 kV pour le continu.

Les métros

La première ligne de métro du monde est inaugurée à Londres en janvier 1863. À Paris, la première ligne est inaugurée le 19 juillet 1900, et ce nouveau mode de transport connaît un véritable engouement : en six mois, près de vingt millions de voyageurs l'empruntent. À l'époque, chaque motrice est équipée de deux moteurs électriques de 92 kW chacun. D'autres lignes sont construites à Paris en quelques années : en 1914, par exemple, sept sont déjà réalisées. On peut dire que le réseau parisien actuel est pratiquement achevé en 1939, avec 159 kilomètres de voies. Mais les améliorations techniques, elles, ne cessent de se développer jusqu'à nos jours : qualité des suspensions, des moteurs, de la régulation du trafic, etc.

De façon générale, les moteurs équipant les motrices de métro ne peuvent être aussi lourds et volumineux que ceux des motrices de train, pour des raisons d'encombrement. La technologie généralement retenue est celle du courant continu, avec des tensions comprises la plupart du temps entre 500 et 1 000 V. À titre d'exemple de réalisation récente, on peut citer le métro de l'agglomération rouennaise. Chaque rame, longue de 29 mètres environ, peut accueillir au maximum 255 personnes, et dans ces conditions la masse atteint environ 62 tonnes. Cette rame est supportée par trois bogies. Le bogie central est simplement porteur. Les bogies avant et arrière sont moteurs, chacun « consommant » une puissance électrique de 275 kW. L'alimentation de chacun de ces moteurs est faite en courant continu de tension 750 V³⁶.

• Questionnaire spécifique à la physique

Questions niveau 1 (réponses dans le texte)

– Quelle est l'ordre de grandeur de la puissance électrique d'une motrice ?

(Réponse : quelques MW).

– Pourquoi de nombreuses motrices sont-elles « bicourant » ? Que signifie cette expression ?

32. La toute première ligne ferroviaire électrifiée est la ligne Paris Invalides-Moulineaux, en avril 1900. Cette mise en service précède donc de peu celle de la première ligne de métro, Vincennes-Neuilly, en juillet de la même année.

33. Cette électrification exploite le fort potentiel hydroélectrique local.

34. La caténaire est l'ensemble constitué du fil d'alimentation et de ses câbles porteurs. Le dispositif articulé sur le toit de la motrice est appelé pantographe.

35. Tous ces éléments vont dans le sens d'un abaissement des coûts. On évalue la consommation électrique actuelle de la SNCF à environ 1 % de la consommation totale française.

36. Comme le métro parisien, d'ailleurs.



(Réponse : elles peuvent fonctionner en courant alternatif et en courant continu ; cela est nécessaire car de nombreuses lignes sont électrifiées des deux façons suivant les portions).

– Qui fournit le courant alternatif qui alimente le réseau ferré ? Quelle est la fréquence de ce courant ?

(Réponse : EDF, 50 Hz).

Questions niveau 2 (nécessitant de la réflexion et/ou une recherche encyclopédique)

– On sait qu'un moteur doit être alimenté par deux fils, évidemment. Lorsque l'alimentation se fait par caténaire, quel peut être l'autre conducteur ?

(Réponse : il s'agit souvent d'un des rails qui joue ce rôle ; il est relié à la terre pour éviter tout risque de choc électrique).

– Comparer l'ordre de grandeur de la puissance fournie par une tranche de centrale nucléaire à celle « consommée » par une motrice.

(Réponse : de l'ordre de 10^3 MW pour la tranche nucléaire, soit la possibilité d'alimenter à elle seule, en moyenne, plusieurs centaines de motrices ; au 31 décembre 1996, le parc SNCF comportait 2109 locomotives électriques, mais bien sûr toutes ne circulent pas en même temps).

• Questionnaire en liaison avec l'histoire-géographie

– On nous parle dans ce texte de Werner von Siemens. Il a fondé une entreprise qui porte son nom et qui existe toujours. Quel est le secteur d'activité de cette entreprise ?

(Réponse : Siemens, initialement dans l'électrotechnique, a étendu ses activités à de très nombreux domaines : matériels de communication, de transport, d'éclairage, de fourniture d'énergie, équipements de santé, composants électriques et électroniques, etc.)

– En quelle année a été créée la SNCF ? Que signifie ce sigle ?

(Réponse : 1938, Société nationale des chemins de fer français. Elle regroupe et unifie tous les réseaux existants.)

– Quelle est actuellement, en France, la part du transport de marchandise par rail ? Quels sont les modes de transport concurrents et quelles sont leurs parts ?

(Réponse : en 1994, le rail représentait 51×10^9 tonnes x km, qui est l'unité appropriée à cette mesure, soit environ 28 % du trafic, contre 69 % pour la route et 3 % pour la navigation intérieure ; ces chiffres évoluent peu).

Exemples de références bibliographiques

– *Trains de chez nous*, T. Nicolas, MDM, 1996.

– *Quid 98*, D. et M. Frémy, éd. Laffont, 1997.

C8. Quelques risques électriques domestiques et leur prévention

Le texte qui suit ne prétend absolument pas traiter de façon exhaustive l'ensemble des mesures de sécurité se rapportant au courant électrique. Il ne prétend pas non plus avoir de valeur réglementaire ou juridique.

Il est nécessaire de bien distinguer deux aspects de la sécurité électrique :

– en ce qui concerne l'installation électrique elle-même et sa conformité aux normes : ce domaine relève de la compétence d'un professionnel qualifié ; le lecteur intéressé par le sujet consultera avec profit auprès des Caisses régionales d'assurance maladie le document INRS intitulé « Protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques » ; ce document reprend les textes réglementaires de la loi française en vigueur ;

– en ce qui concerne la bonne utilisation de l'installation : cet autre aspect essentiel de la sécurité doit, lui, être connu de tous les utilisateurs, et fait l'objet du développement ci-dessous (qui, encore une fois, ne prétend nullement être exhaustif).

Les effets du courant électrique sur l'organisme

Le courant électrique peut provoquer :

– des brûlures ;

– des tétanies musculaires, et en particulier celle du diaphragme, qui provoque l'asphyxie ;

– la fibrillation cardiaque (tremblements désordonnés des fibres musculaires du cœur) qui aboutit rapidement à la mort.

Le seuil d'intensité dangereuse est difficile à déterminer car il dépend de la fréquence du courant, de la durée d'exposition, mais aussi de la constitution du sujet et du trajet emprunté par le courant.

Différentes études nationales et internationales ont conduit à admettre qu'il n'y a pas de danger, pour un courant de fréquence 50 Hz, tant que l'intensité n'excède pas, par exemple :

– 10 mA pour une durée d'exposition illimitée ;

– 500 mA pour une durée d'exposition inférieure à 0,1 s.

Ces mêmes études ont permis d'apprécier les seuils dangereux en termes de tension, en tenant compte de l'impédance du corps humain. Elles ont conduit à admettre, pour une tension égale ou inférieure à 50 V, un temps d'exposition maximal de 5 secondes sans effet physiopathologique dangereux. Ces valeurs sont reprises dans la norme française NF C 15-100 de 1991 qui précise en particulier les conditions suivantes :

– les locaux (ou emplacements) peuvent être secs ou humides ;

– le courant passe à travers le corps humain entre les deux mains et les deux pieds ;

– le courant est limité par la présence de chaussures ou la résistance du sol ;

– la fréquence du courant alternatif est comprise entre 15 et 1 000 Hz.

D'autres règles sont prescrites dans des conditions d'humidité ou de contact plus sévères (article 481.3 de la même norme).

Pour le courant alternatif, on appelle « très basse tension » (TBT) une tension égale ou inférieure à 50 V.

Depuis la loi 91-1 du 3 janvier 1991, article 30, certains articles du Code du travail s'appliquent aux établissements scolaires. Les salles de TP sont directement concernées. Il en



résulte certaines obligations, comme l'interdiction d'avoir des parties métalliques directement accessibles soumises à une tension supérieure à 50 V. Il est utile de consulter les

Caisses régionales d'assurance maladie pour connaître l'ensemble des règles en vigueur et leur service prévention (INRS).

Quelques conseils

Situations	Risque	Prévention	Comportement
<p>Circuits fixes réalisés par les électriciens.</p> <p>C'est une alimentation monophasée en dérivation : tension alternative 230 V de fréquence 50 Hz entre phase et neutre ou entre phase et terre.</p>	<p>Tout contact accidentel avec seulement un conducteur peut entraîner une électrocution.</p> <p>La tension est présente entre les bornes d'une prise de courant même si aucun appareil n'est branché.</p> <p>La tension entre le neutre et la terre peut ne pas être nulle : il existe un réel danger d'électrocution même lors d'un contact avec le neutre.</p>	<p>Chaque fil conducteur utilisé (en cuivre) doit posséder une isolation adaptée aux milieux qu'il traverse.</p> <p>Les éléments de circuit à la portée des utilisateurs (interrupteurs, prises de courant) seront isolés et les parties conductrices qu'ils comportent ne devront pas être accessibles.</p> <p>L'utilisation du tournevis cherche-phase ou testeur permet de mettre le conducteur de phase en évidence et d'en déduire le neutre.</p>	<p>Toute intervention sur le circuit électrique doit être effectuée par un professionnel qualifié.</p> <p>Seule la coupure au disjoncteur permet la mise hors circuit de l'installation domestique par rapport au réseau EDF pour la réalisation de quelques tâches de dépannage (changer une lampe ou changer une protection par coupe-circuit).</p> <p>Ne pas croire que, si l'interrupteur est ouvert, il n'y a plus de danger.</p>
<p>Locaux humides (salles de bains, cuisines, caves...).</p>	<p>Graves dangers d'électrocution notamment si l'isolation électrique présente le moindre défaut.</p>	<p>Matériel parfaitement isolé, adapté et en parfait état.</p> <p>Prises de courant éloignées des arrivées d'eau.</p> <p>Appareils électriques isolés (double isolation) ou reliés à la prise de terre.</p> <p>Séparation du circuit d'utilisation et du circuit EDF par un transformateur d'isolement.</p>	<p>L'utilisation de matériels électriques nécessite des mains sèches.</p> <p>On évitera toute manipulation dans une enceinte humide (salle inondée par exemple).</p>
<p>L'utilisation de récepteurs électriques sur les prises de courant.</p>	<p>Échauffement des conducteurs traversés par une intensité trop forte.</p> <p>Un conducteur métallique s'échauffe lorsqu'il est traversé par un courant électrique.</p> <p>Cet échauffement augmente avec l'intensité du courant qui le traverse.</p> <p>L'intensité que peut supporter un conducteur de section donnée ne doit pas dépasser une valeur limite, sinon on risque de détruire les isolants, de provoquer un incendie.</p>	<p>À partir du circuit principal d'une alimentation, des lignes (neutre + phase) sont montées en dérivation. On obtient ainsi une séparation des circuits.</p> <p>Les sections de conducteurs de chaque ligne sont adaptées à la puissance donc à l'intensité.</p> <p>Prises spécifiques selon l'intensité qu'elles peuvent supporter.</p> <p>Au départ de chaque ligne, un coupe-circuit à maximum d'intensité adapté à la section des conducteurs.</p>	<p>N'utiliser que des fusibles adaptés à chaque ligne (coupant si l'intensité maximale que peut supporter la ligne est atteinte).</p>



Situation	Risque	Prévention	Comportement
Cordons d'appareils ou rallonges électriques.	Électrocutions avec des fils dénudés.	Cordons et rallonges isolés en fonction du lieu et des conditions d'utilisation.	Pour débrancher un cordon électrique, ne pas tirer sur le câble, mais attraper la fiche électrique (certaines fiches sont désormais adaptées à une bonne préhension).
Appareils domestiques possédant une carrosserie métallique (réfrigérateur, machine à laver, lave-vaisselle, fer à repasser).	Électrocution par contact accidentel avec cette enveloppe. Cette partie conductrice peut être en contact avec la phase (fil dénudé à l'intérieur, etc.).	Utilisation des prises de terre des appareils ménagers pour que disjoncteur différentiel assure la protection. Double isolation d'appareils électriques domestiques «portables» : utilisation sans prise de terre.	Conformité de l'installation électrique : vérification de la qualité de la prise de terre et du niveau de la protection différentielle utilisée.
Branchement d'un grand nombre d'appareils électriques sur des prises.	Coupure de l'alimentation électrique.	Cartouche fusible dans le court-circuit adaptée à la section des conducteurs de la ligne.	Ne brancher en même temps que les appareils ne faisant pas dépasser l'intensité maximale admissible.
Appareils ménagers anciens, câbles d'alimentation usagés (isolants qui vieillissent et se fendillent, fortes contraintes mécaniques). Contact accidentel entre la phase et le neutre.	Courts-circuits. Sans protection de l'installation, les courts-circuits provoqueraient une augmentation brutale de l'intensité dans les conducteurs, leur échauffement, la destruction des isolants et seraient ainsi à l'origine d'incendie.	L'isolement des câbles doit être vérifié. Sur chaque ligne, le coupe-circuit (cartouche fusible ou coupe électromagnétique) doit intervenir si l'intensité maximale que peuvent supporter les conducteurs de cette ligne est atteinte.	Il conviendra de ne plus utiliser l'appareil à l'origine du court-circuit (réparation éventuelle par un spécialiste).
Alimentation avec des boîtiers multiprises.	Échauffement du cordon si l'on branche beaucoup d'appareils.		La somme des puissances des différents appareils branchés ne doit pas dépasser la puissance indiquée sur le boîtier.

C. Lumière et images

E6. Comment une lentille forme-t-elle une image ?

Objectifs

Introduire la notion d'image donnée par une lentille et ses conditions d'obtention.

Faire constater expérimentalement que l'image est observable en vision directe et qu'un écran permet de pointer sa position de façon précise.

Cette activité devra laisser une trace écrite, au moins sous la forme d'un tableau de réponses complété par l'élève.

Matériel (pour chaque groupe)

- Trois lentilles (deux convergentes, de distances focales 5 cm et 10 cm par exemple, et une divergente).
- Feuille au centre de laquelle l'élève écrit ses initiales (hauteur 5 mm).
- Lampe à filament quasi ponctuel et son alimentation.
- Écran ou feuille blanche.

Expérience 1 : manipulation de lentilles et observation d'objets proches ou éloignés

- **Première étape** : prendre l'une des lentilles en la tenant devant soi à la main. Regarder à travers la lentille divers objets lointains (paysage, camarades) ou proches (page de



livre) en faisant varier la distance entre la lentille et l'œil. On observe une reproduction de l'objet qu'on appellera image.

• **Deuxième étape** : décrire ce qui est observé : sens de l'image, dimension comparée à celle de l'objet.

Cette étude doit permettre de distinguer les lentilles convergentes (à bords minces) des lentilles divergentes (à bords épais). L'image d'un objet lointain est droite pour la divergente et renversée pour la convergente.

Expérience 2 : lentilles convergentes, utilisation en « loupe », et obtention d'images renversées

Mettre sur la table la feuille sur laquelle l'élève a écrit ses initiales. Poser d'abord la lentille à plat contre la feuille sur la partie écrite. En se tenant debout, regarder à travers la lentille en éloignant progressivement la lentille de la feuille. Décrire ce qui est observé.

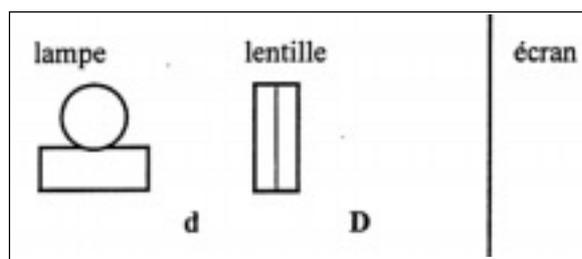
(L'image est d'abord nette, droite et agrandie ; puis, la distance lentille-feuille ayant augmenté, elle devient floue et ensuite une image nette et renversée apparaît. La distance lentille-feuille à laquelle commence le brouillage donne une première mesure de ce qui sera appelé distance focale.)

Expérience 3 : notion d'image d'un point source

Une lampe allumée (à filament quasi ponctuel) est posée sur la table. Un écran vertical placé à quelques centimètres à côté de la lampe est complètement éclairé.

Placer ensuite la lentille convergente près de la lampe (par exemple à 2 cm).

Placer l'écran de l'autre côté de la lentille (figure 1), on observe une trace lumineuse circulaire. L'observation du diamètre de cette tache lorsqu'on éloigne progressivement l'écran de la lentille permet de préciser si le faisceau est divergent ou convergent.



Reprendre l'expérience ci-dessus après avoir augmenté la distance d entre la lentille et la lampe. Recommencer pour des distances croissantes.

Repérer la distance d pour laquelle le faisceau après la lentille est quasi cylindrique. On retrouve la distance focale mesurée dans l'expérience 2.

Éloigner davantage la lentille du filament. Le faisceau après la lentille converge puis diverge. Au « point » de convergence, on peut voir l'image du filament sur l'écran.

Conclusion

Si la distance entre un petit objet et une lentille convergente est inférieure à une certaine distance caractéristique de la

lentille (la distance focale), le faisceau qui émerge diverge (c'est le cas de l'utilisation en loupe).

Si la distance est supérieure à la distance focale, le faisceau qui traverse la lentille et qui vient de l'objet assimilé à un point converge vers un point appelé image du point objet, au-delà le faisceau diverge. Les rayons se croisent à l'endroit de l'image.

E7. Un appareil imageur : la lunette astronomique

Objectif pédagogique

Utilisation d'un instrument comportant deux lentilles convergentes. La première (objectif) donne d'un objet lointain une image réelle, la deuxième joue le rôle de loupe pour regarder l'image formée par la première. L'utilisation de cet instrument peut être une occasion de poursuivre des activités d'observation astronomique commencées au cycle central.

Préliminaires

Une lentille convergente forme dans un plan (plan focal) une image renversée des objets lumineux éloignés (à l'infini), image que l'on peut observer par visée directe et dont on peut trouver la position à l'aide d'un écran.

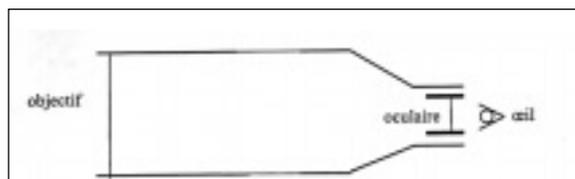
L'observation à travers une lentille convergente utilisée comme loupe permet d'observer plus de détails.

Matériel

Une petite lunette astronomique, si on en possède une, ou une lunette simplifiée fabriquée à l'aide de deux lentilles. L'objectif doit avoir une longue focale (50 cm à 1 m) et l'oculaire une courte focale (5 cm au plus, par exemple loupe d'horloger).

Expérience

Observation d'un objet lointain. Attention à ne jamais observer directement le Soleil à travers un instrument.



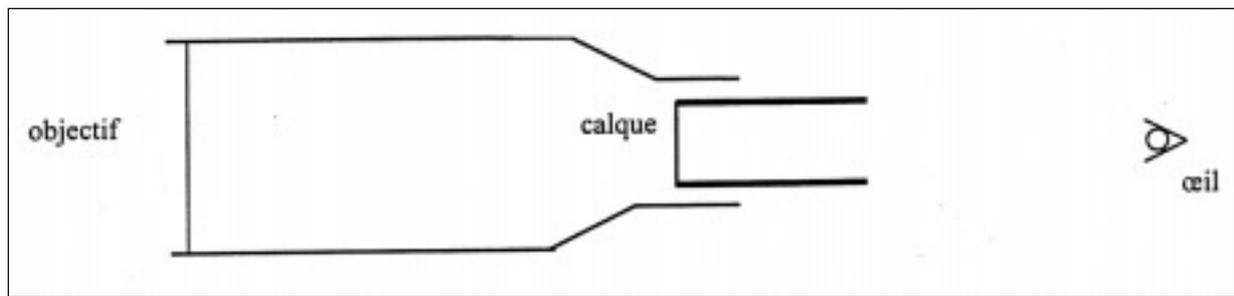
– Viser un objet bien contrasté à l'horizon (ou la Lune) avec une lunette. Faire la mise au point en déplaçant l'oculaire. Décrire l'image obtenue en la comparant à ce qui est vu à l'œil nu.

– Enlever l'oculaire.

Viser directement à travers l'objectif (il est nécessaire de reculer l'œil d'une vingtaine de centimètres par rapport à sa position avec oculaire).

Pointer la position de l'image en utilisant un papier calque en guise d'écran pour rechercher l'image formée (il est utile de le fixer à l'extrémité d'un petit tube qui va coulisser à la place de l'oculaire). L'image diffusée par l'écran est moins lumineuse qu'en vision directe.





Vérifier que la distance écran-objectif est bien égale à la distance focale de l'objectif donnée par le constructeur.

Remettre l'oculaire en place, celui-ci joue le rôle de loupe pour observer l'image précédente.

On repère les détails supplémentaires observés à travers l'instrument complet.

Remarques

- Une lunette ne doit jamais être utilisée directement pour observer le Soleil. Les constructeurs vendent des filtres qui se vissent sur l'oculaire, mais ces filtres, proches du foyer de l'objectif, s'échauffent et peuvent se briser brusquement ; il est donc dangereux et vivement déconseillé de les utiliser. Pour une observation à travers l'instrument seuls les filtres spéciaux qui recouvrent complètement l'objectif peuvent être utilisés mais ils coûtent cher. La meilleure façon d'observer le Soleil ou une éclipse de Soleil à l'aide d'une lunette est de projeter l'image du Soleil sur un écran (sol ou mur) derrière l'instrument en effectuant la mise au point en tirant l'oculaire.
- L'observation d'un ciel étoilé à travers la lunette permet de mieux voir les couleurs des étoiles et d'en voir un plus grand

nombre. Chaque étoile apparaît comme un point (ou une petite tache). Plus le diamètre de l'objectif est grand à distance focale donnée, plus l'œil reçoit de lumière et plus on voit d'étoiles.

- Lors de l'observation de la Lune, si le diamètre de l'objectif est grand il est nécessaire d'utiliser un filtre (en général vert) pour ne pas être ébloui.

Évaluation

- Quel est le rôle d'une lunette astronomique dans l'observation de la Lune ou d'un objet lointain ?
- Quelles sont les parties d'une lunette astronomique simple ?
- Où est situé l'objet par rapport à l'instrument ? Où faut-il placer l'œil ?
- Les observateurs photographient fréquemment l'image « au foyer ». Que signifie cette expression ?

Bibliographie

- Hors série n° 4, *Astronomie en 4^e*, CLEA (Comité de liaison enseignants astronomes).