

Les matériaux

Primaire et collège

Résumé

Le présent chapitre est consacré aux solides, et plus particulièrement, parmi eux, à ceux qui jouent un rôle significatif dans l'évolution de nos civilisations et de nos sociétés, que l'on appelle souvent les matériaux. On retrouve là, pêle-mêle, des substances aussi différentes que le bois, le béton, le verre, l'acier, les roches...

les matériaux

Yves Quéré

La matière qui nous entoure peut se présenter – suivant la TEMPÉRATURE et/ou la pression – sous trois formes (on dit plutôt états) distinctes : les solides présentent une certaine dureté et conservent en général leur forme (le bois, une pierre, la glace...); les liquides se répandent dans le récipient qui leur est affecté et prennent la forme de celui-ci (l'eau, l'essence, l'huile...); les gaz sont le plus souvent invisibles, impalpables, mais ils se manifestent à nous par leurs effets (l'air, par le vent; le gaz carbonique, par ses bulles dans le champagne...).

Nous savons, au moins dans le cas de l'eau, que la matière est souvent susceptible de passer d'un état à l'autre : la glace, solide, fond à 0°C et devient de l'eau; celle-ci, liquide, bout à 100°C et devient de la vapeur d'eau, qui est un gaz. Dans ces trois formes, il s'agit toujours de la même matière, l'eau. Celle-ci est constituée d'une myriade de petits grains élémentaires, les MOLÉCULES, toutes identiques, mais disposées différemment dans les trois cas précédents. La molécule d'eau (en CHIMIE : H₂O) est elle-même un regroupement de deux ATOMES d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Il y a, dans un petit verre d'eau, environ dix milliards de milliards de millions de ces molécules, tassées les unes contre les autres. Pour prendre ici une image, si nous faisons jouer à un grain de sable

le rôle d'une molécule d'eau, alors, sur la plage, un seau de sable, fluide, nous donnera l'image de l'eau (liquide); un bloc de sable collé, celle de la glace (solide); une poignée de sable jetée en l'air et dispersée, celle de la vapeur (gaz). Dans ces trois cas, le grain de sable (la molécule) est toujours le même.

Le présent chapitre est consacré aux solides et plus particulièrement, parmi eux, à ceux qui jouent un rôle significatif dans l'évolution de nos civilisations et de nos sociétés, que l'on appelle souvent les matériaux. On retrouve là, pêle-mêle, des substances aussi différentes que le bois, le béton, le verre, l'acier, les roches... C'est dire qu'il n'est pas question de décrire ici l'ensemble des matériaux dans leur diversité. L'objectif est plutôt de saisir ce qu'ils ont en commun et de comprendre certaines de leurs propriétés parmi celles qui nous sont – souvent journallement – familières. De ce point de vue, nous commencerons par décrire les plus manifestes des propriétés macroscopiques (vision à grande échelle, la nôtre) des matériaux, c'est-à-dire celles qui sont accessibles à nos sens ou à des expériences très rudimentaires. Puis nous en donnerons une vision plus explicative, dite microscopique dans la mesure où elle mettra en scène les constituants ultimes de la matière que sont notamment les molécules, les atomes et les électrons.

Description macroscopique

L'ordre choisi ici pour lister les plus notables des propriétés des matériaux correspond approximativement à celui où elles sont apparues à l'homme : l'âge de pierre, l'âge de la terre cuite, l'âge du bronze...

La dureté

Les matériaux sont en général perçus comme durs. En fait, ils le sont plus ou moins, avec des différences très grandes de l'un à l'autre. Entre une pierre du bord du chemin et une règlette en plastique, l'enfant saura sans doute d'instinct faire le classement. Peut-être saura-t-il même imaginer comment le « prouver », c'est-à-dire réinventer le test de la rayure, test qui permet de classer deux matériaux entre eux, le plus dur étant celui qui raye l'autre et n'est pas rayé par lui.

La fragilité

Certains matériaux se brisent à la moindre sollicitation : on les dit « fragiles », tandis que d'autres peuvent être manipulés tant et plus sans se casser. La fragilité, qui est souvent un inconvénient (bris des vitres, rupture de câbles...), a été utilisée positivement, pendant des centaines de millénaires, pour obtenir lors de la taille des silex des formes variées. Le silex est en effet un matériau qui, frappé, se casse sans se déformer.

Il existe une certaine corrélation entre fragilité et dureté, les matériaux durs, comme les roches ou le verre, étant fréquemment fragiles.

On se méfiera ici d'une ambiguïté lexicale fréquente chez les enfants pour qui, au contraire, dureté s'opposerait à fragilité, les matériaux durs étant dans leur esprit ceux qui ne sont pas fragiles.

Les transformations réversibles

Il est courant d'assister à des modifications, parfois profondes, de certains matériaux soumis à certaines conditions (ou contraintes). Si la transformation disparaît lorsque la contrainte disparaît, on dit qu'elle est « réversible ».

L'élasticité

C'est un bon exemple de transformation réversible. Si l'on exerce une force sur un matériau, il tend à se déformer dans le sens de la force. Tant que celle-ci demeure relativement modérée, le matériau peut reprendre sa forme initiale, une fois la force supprimée. Vraie à l'évidence pour un « élastique » en caoutchouc, cette propriété est générale. On peut l'observer dans le cas d'une branche d'arbre (ou d'un tronc) qui « ploie » dans le vent, d'une tringle de rideau qui se courbe sous le poids du tissu...

La fusion

Comme la solidification d'un solide, la fusion constitue un autre exemple de transformation réversible. À une certaine température (appelée parfois POINT DE FUSION), un solide se transforme en liquide. Ici, on observe un changement d'état de la substance bien que sa nature chimique reste



Les enfants mesureront l'allongement élastique d'un ruban de caoutchouc (de un ou deux décimètres de longueur). Placé devant une règlette graduée en millimètres, et chargé de poids successifs croissants, le ruban s'allonge. Le graphe de l'allongement en fonction du poids – c'est-à-dire de la force appliquée – montre que le premier est proportionnel au second. On s'assurera que le ruban reprend sa longueur initiale lorsque les poids sont retirés et qu'il y a donc bien réversibilité mécanique.



- On pourra mettre deux ou trois glaçons dans un verre, peser le tout, et laisser la glace fondre (éventuellement en chauffant légèrement le verre). En plongeant un thermomètre dans le mélange eau-glace, on observera que la température demeure constante (malgré la CHALEUR apportée) jusqu'à fusion de toute la glace. On refera alors une pesée et l'on s'assurera que la MASSE de l'eau est la même que celle de la glace qui lui a donné naissance. Si l'on dispose d'un congélateur, on y placera le verre et son eau et l'on constatera que, après un certain temps, toute l'eau a redonné naissance à de la glace (phénomène de solidification), dont la masse est à nouveau la même. Puis on pourra faire fondre à nouveau cette glace... : réversibilité du phénomène de fusion. Il y a aussi réversibilité dans le phénomène inverse de solidification.
- Il conviendra de souligner que si la masse est conservée, lors de la fusion ou de la solidification, il n'en est pas de même du volume : à masse égale, la glace occupe un volume un peu supérieur à celui de l'eau liquide.

la même. D'autres propriétés sont également modifiées lors de cette transformation : le volume, parfois la COULEUR...

La dilatation thermique

Voilà un autre exemple de transformation réversible. En effet, si l'on chauffe un matériau, son volume (donc aussi sa longueur, et l'on parle alors de « dilatation linéaire ») tend très généralement à augmenter : on dit qu'il se dilate. Mais si on le refroidit et qu'on le ramène à sa température initiale, il reprend

son volume (ou sa longueur) initial(e). L'amplitude de la dilatation thermique variant beaucoup d'un corps à un autre, on la définit par le coefficient de dilatation linéaire qui est la variation relative de longueur par degré Celsius d'échauffement. Ce coefficient est couramment de l'ordre de 10^{-5} par °C. Ainsi, la tour Eiffel, en passant de -10°C à $+20^{\circ}\text{C}$, s'allonge de $10^{-5} \times 30$ en valeur relative, soit donc de $300 \times 30 \times 10^{-5}$ (puisqu'elle mesure 300 m), soit finalement de 9 cm en valeur absolue.



- En regardant, au travers d'un verre noir, le filament d'une ampoule au moment où l'on allume celle-ci, les enfants constateront que le filament, fixe à ses deux extrémités, se courbe – donc qu'il s'allonge – sous l'effet de la chaleur, tandis qu'il reprend sa forme, donc sa longueur initiale, lorsqu'on éteint l'ampoule.
- Les liquides se dilatent aussi : on observera la colonne liquide d'un thermomètre (à mercure ou à alcool) lorsqu'on le chauffe.

Les transformations irréversibles

Ce sont celles qui affectent d'une manière définitive les propriétés des matériaux. Elles ne donnent donc pas lieu à un possible retour spontané à l'état initial. Nous en distinguerons trois, d'importance capitale pour l'utilisation pratique des matériaux.

Les transformations thermiques

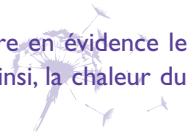
Elles se produisent lorsque le matériau est soumis à un traitement thermique, généralement de haute température (on

pensera à l'art du potier). Un bon exemple est la cuisson des argiles, qui transforme un matériau mou et plastique en un solide (la terre cuite) dur et généralement cassant.

Ce qui se produit sous l'effet de la température est une modification chimique de l'argile, due principalement à une perte de molécules d'eau incluses dans l'argile de départ. Cette modification peut aussi avoir lieu sous l'effet de la pression (éventuellement conjugué avec celui de la température).



De petits objets en argile ou en pâte à modeler seront cuits dans un four pour mettre en évidence le durcissement. On fera remarquer que les tuiles, de très longue date, sont fabriquées ainsi, la chaleur du Soleil suffisant parfois pour obtenir un matériau de qualité médiocre, mais utilisable.



Les transformations mécaniques

Elles ont fortement marqué l'histoire des civilisations (on pensera ici à l'art du forgeron). Après la taille du silex, après l'introduction de la poterie, la grande découverte, pour la mise en forme des matériaux, a été que l'on peut modifier la forme des métaux et des alliages métalliques, grâce à leur grande malléabilité, en exerçant sur eux des efforts mécaniques, autrement dit des forces (âge de bronze et âge de fer).

La plus ancienne, probablement, des méthodes utilisées est le martelage, qui consiste à frapper un métal avec une masse. Celui-ci se déforme alors (généralement sans se casser, contrairement au silex) au gré des coups reçus. La déformation est plus facile et plus sûre si l'on chauffe la pièce, ce que, traditionnellement, fait le

forgeron. Actuellement, on ne compte plus le nombre de procédés industriels de mise en forme des métaux : par laminage entre deux rouleaux on en fait des plaques ou des tôles ; par tréfilage au travers de filières (trous percés dans un matériau très dur) on en fait des fils ; par emboutissage et étirage, on en fait des récipients (casseroles, canettes...), par forgeage, à l'aide de presses très puissantes, on donne une forme préétablie à un lingot (fabrication des roues de wagons...).

On a remarqué très tôt que la déformation s'accompagnait généralement d'un durcissement du matériau. Ainsi, en frappant le métal, le forgeron lui donne la forme voulue, et dans le même temps lui confère plus de dureté, ou de rigidité : on dit alors de ce métal qu'il est « écroui ».



Les enfants observeront la malléabilité des métaux en tordant, ou en pliant des échantillons métalliques (fil de fer, « papier » d'aluminium, trombone de papeterie...) qui changent de forme sans casser et restent déformés lorsque l'effort est relâché.



Les transformations chimiques

Chacun sait bien que la matière qui nous entoure se modifie d'« elle-même » au cours du temps : le fer rouille, l'argent noircit, les plastiques durcissent, le papier se fragilise, le bois pourrit... Beaucoup de ces altérations sont en fait dues à l'action (chimique) d'un agent extérieur (oxygène, eau, soufre...) qui, en contact avec le matériau, finit par pénétrer en lui et le modifier « à l'intérieur », parfois radicalement. Cette pénétration s'appelle la DIFFUSION (voir pp. 186-187) et le phénomène d'agression prend souvent (notamment dans le cas des métaux) le nom de CORROSION.

À titre d'exemple, du fer mis en présence d'oxygène (notamment celui de l'air) absorbe cet oxygène par diffusion et se transforme en un OXYDE de fer, substance différente du fer par l'aspect (les oxydes de fer sont de couleur brun rougeâtre), par la tenue mécanique (ils sont friables et pulvérulents), par la CONDUCTIBILITÉ (ils sont à la fois mauvais conducteurs de la chaleur et isolants électriques) et, bien sûr, par la composition chimique (les principaux oxydes ayant les compositions FeO , Fe_2O_3 et Fe_3O_4).



On disposera du fer (fil, clous...) dans une coupelle que l'on pèsera soigneusement. On laissera ce fer rouiller à l'air (en atmosphère humide, ce sera plus rapide). On pèsera régulièrement la coupelle et l'on constatera que la masse augmente, jusqu'à une valeur limite correspondant à l'oxydation totale. L'augmentation de masse correspond à la fixation d'oxygène par le fer.

La conduction thermique

Si l'on verse de l'eau chaude dans un bol (ou dans un pot), la température de la paroi extérieure du bol s'échauffe progressivement et tend vers celle de l'eau. Nous sommes amenés à penser qu'une partie de la chaleur, incluse dans l'eau et fournie par

elle, s'est propagée dans le matériau du bol de l'intérieur vers l'extérieur : le matériau a « conduit » de la chaleur : cette propriété s'appelle la CONDUCTION thermique. Elle se caractérise par une grandeur, la conductibilité thermique, très variable d'un matériau à un autre.



L'expérience précédente réalisée successivement avec trois pots, l'un en faïence, l'autre en acier inox, l'autre enfin en argent, d'épaisseurs identiques (ou comparables) montre que les conductibilités sont fort différentes : la chaleur est mieux (ou beaucoup plus vite) conduite dans l'argent que dans l'inox, et dans l'inox que dans la faïence. On en déduit donc que la conductibilité thermique de l'argent est supérieure à celle de l'inox, qui est supérieure à celle de la faïence.

Cette différence entre les conductibilités thermiques se manifeste dans la notion d'isolation thermique. Pour l'illustrer, on enveloppera des glaçons dans divers matériaux : écharpe de laine, feuilles d'aluminium, feuilles de plastique... et on mesurera le temps que mettent les glaçons pour fondre. Ce temps sera nettement plus grand dans le cas de la laine (conductibilité thermique faible, en raison de la présence d'air emprisonné entre les fibres) que dans le cas de l'aluminium (conductibilité élevée). On soulignera que la conduction joue « dans les deux sens » : ainsi, la laine utilisée l'hiver pour se protéger du froid, sert aussi aux Touaregs du Sahara à se protéger de la chaleur ; ainsi, l'isolation thermique des maisons est utile l'hiver dans un sens, et l'été dans l'autre.

La conduction électrique

C'est un fait d'expérience que l'électricité « passe » dans un métal ou dans un alliage, soumis à la « tension » (en volts) d'une pile ou d'une « prise » électrique, mais pas, par exemple, dans le bois. On dit que les métaux sont « conducteurs » et que les autres matériaux sont « isolants ». Ces derniers comprennent de nombreuses substances, naturelles ou synthétiques, qui servent en particulier à isoler les circuits électriques ou les outils permettant d'y accéder en toute sécurité (bakélite, céramiques, porcelaine...).

La conductivité électrique

Comme dans le cas de la conduction thermique, les conducteurs se distinguent les uns des autres par la capacité plus ou moins grande qu'ils ont de laisser circuler le courant électrique : c'est la conductivité électrique dont l'inverse est la résistivité électrique. Il est remarquable que plus un métal est bon conducteur de l'électricité (conductivité électrique élevée), plus il est bon conducteur de la chaleur. Ainsi l'argent est, de tous les métaux, à la fois le meilleur conducteur de l'électricité et de la chaleur. À l'inverse, l'acier



On réalisera un circuit électrique (pile de 4,5 V, fils, lampe) que l'on interrompra en un endroit où il est possible d'intercaler divers matériaux. Les enfants testeront plusieurs d'entre eux (acier, aluminium, or, bois, plastique...) puis les classeront en deux catégories : conducteurs et isolants.

inox est un assez mauvais conducteur de l'électricité, mais aussi de la chaleur. Cette propriété est décrite par ce que l'on appelle la « loi de Wiedemann et Franz ».

Un fil conducteur parcouru par un courant électrique est le siège d'un dégagement de chaleur (« effet Joule »). Ce dégagement de chaleur est d'autant plus grand, pour une tension donnée, que la conductivité électrique est plus grande.

Le magnétisme

Un courant électrique passant dans un fil modifie l'espace autour de ce fil : il y crée un « champ magnétique », phénomène invisible mais très réel.



On présentera aux enfants des petits aimants de papeterie et on leur fera découvrir les forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre eux. Ils pourront trouver là une belle illustration de la notion de force et notamment la preuve que des forces peuvent s'exercer d'un corps à un autre, à distance – c'est le cas des forces de GRAVITATION universelle – et non nécessairement au contact.

Il existe, sur Terre, un champ magnétique terrestre dont l'origine est due à des courants électriques qui circulent à l'intérieur du globe. Une aiguille aimantée, en matériau ferromagnétique, est soumise



On montrera des boussoles aux enfants et on leur fera approcher un aimant de l'aiguille. La rotation de celle-ci illustrera à nouveau la notion de « force à distance ». Ils observeront que cette force diminue lorsqu'on éloigne l'aimant de l'aiguille.

Vision microscopique

Dans ce qui précède, nulle mention n'a pratiquement été faite de ce que contiennent, de manière constitutive, les matériaux. Les propriétés que nous avons décrites ne sauraient cependant en être indépendantes. Il s'agit donc de tenter d'arriver à une certaine forme de compréhension. Sans pousser la comparaison bien loin, nous dirons que le comportement global d'un

Lorsque les matériaux sont placés dans un champ magnétique, ils modifient souvent ce dernier. Ils tendent parfois à l'amplifier fortement. On dit dans ce cas qu'ils sont « ferromagnétiques », en raison du fait que le fer présente cette propriété. Parfois aussi, ayant été exposés à un champ magnétique, ces matériaux en conservent la mémoire, comme s'ils le « piègeaient » en eux-mêmes. Ils ont alors la capacité de créer, dans leur voisinage, un champ magnétique qui leur est propre, indépendant du courant électrique initial. Ce sont là des aimants permanents. Le lien entre courants électriques et magnétisme ouvre ce grand domaine de la physique qu'est l'électromagnétisme, où se sont illustrés, entre autres, Ampère et Maxwell.

de la part de ce champ à une force qui – si l'aiguille est libre de tourner librement – la dirige approximativement vers le nord géographique : c'est le principe de la boussole.

pays, dans son histoire, est mieux compris si l'on connaît la nature de ses habitants, leurs caractéristiques générales et parfois particulières.

Ce qui caractérise un matériau à l'échelle microscopique, ce sont ses atomes, dont nous savons qu'ils sont les plus petits éléments caractéristiques d'un corps simple. On désigne ainsi les 92 éléments du tableau périodique de Mendeleïev. La liste en

groupe
IA

Le tableau périodique des éléments de Mendeleïev

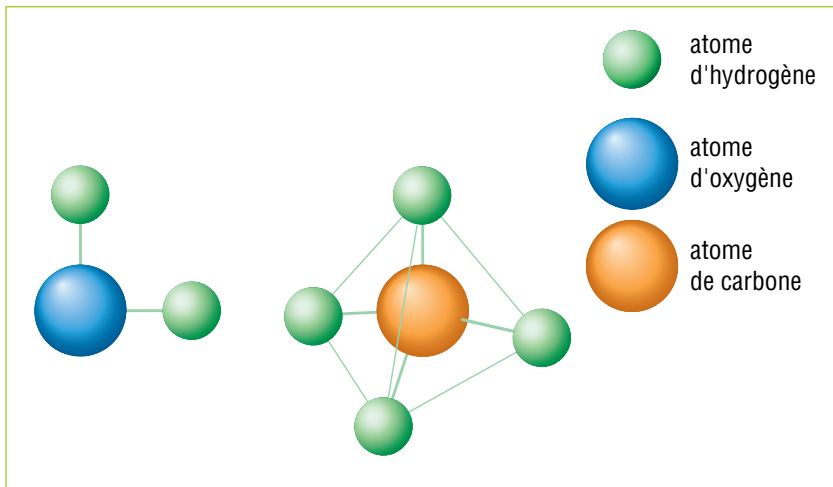
																		VIII A													
Hydrogène H 1												III A		IV A		V A		VI A		VII A		VIII A									
Lithium Li 3		Béryllium Be 4		éléments de transition										Bore B 5		Carbone C 6		Azote N 7		Oxygène O 8		Fluor F 9		Néon Ne 10							
Sodium Na 11		Magnésium Mg 12		III B		IV B		V B		VI B		VII B		VIII		IB		IIB		Aluminium Al 13		Silicium Si 14		Phosphore P 15		Souffre S 16		Chlore Cl 17		Argon Ar 18	
Potassium K 19	Calcium Ca 20	Scandium Sc 21	Titane Ti 22	Vanadium V 23	Chrome Cr 24	Manganèse Mn 25	Fer Fe 26	Cobalt Co 27	Nickel Ni 28	Cuivre Cu 29	Zinc Zn 30	Gallium Ga 31	Germanium Ge 32	Arsenic As 33	Sélénium Se 34	Brome Br 35	Krypton Kr 36														
Rubidium Rb 37	Strontium Sr 38	Yttrium Y 39	Zirconium Zr 40	Niobium Nb 41	Molybdène Mo 42	Technétium Tc 43	Ruthénium Ru 44	Rhodium Rh 45	Palladium Pd 46	Argent Ag 47	Cadmium Cd 48	Indium In 49	Étain Sn 50	Antimoine Sb 51	Tellure Te 52	Iode I 53	Xénon Xe 54														
Césium Cs 55	Baryum Ba 56	Lanthane La 57	Hafnium Hf 72	Tantale Ta 73	Tungstène W 74	Rhénium Re 75	Osmium Os 76	Iridium Ir 77	Platine Pt 78	Or Au 79	Mercure Hg 80	Thallium Tl 81	Plomb Pb 82	Bismuth Bi 83	Polonium Po 84	Astate At 85	Radon Rn 86														
Francium Fr 87	Radium Ra 88	Actinium Ac 89	Unilquadium Unq 104															Cérium Ce 58	Praséodyme Pr 59	Néodyme Nd 60	Prométhium Pm 61	Samarium Sm 62	Europium Eu 63	Gadolinium Gd 64	Terbium Tb 65	Dysprosium Dy 66	Holmium Ho 67	Erbium Er 68	Thulium Tm 69	Ytterbium Yb 70	Lutétium Lu 71
				Thorium Th 90	Protactinium Pa 91	Uranium U 92	Neptunium Np 93	Plutonium Pu 94	Américium Am 95	Curium Cm 96	Berkelium Bk 97	Californium Cf 98	Einsteinium Es 99	Fermium Fm 100	Mendélévium Md 101	Nobélium No 102	Lawrencium Lw 103														

commence par l'hydrogène, qui porte le n° 1 (numéro atomique correspondant au nombre d'électrons qui le composent), puis l'hélium (n° 2)... jusqu'à l'uranium (n° 92). Il existe bien quelques corps simples supplémentaires (jusqu'au n° 112), mais ils sont artificiels (fabriqués dans les accélérateurs de particules et instables, donc non durables) et n'ont aucun intérêt pour notre présent propos. Certains de ces corps simples ont des noms familiers, comme l'hydrogène déjà nommé, le carbone (n° 6), l'azote (n° 7), l'oxygène (n° 8), le silicium – et non le « silicone », comme on le lit trop souvent – (n° 14), le soufre (n° 16), le fer (n° 26), le cuivre (n° 29), l'argent (n° 47), le mercure (n° 80), le plomb (n° 82)... (voir le tableau de Mendeleïev ci-dessus).

Ce qu'il importe de retenir ici, c'est que l'ensemble de la matière qui nous entoure est constituée à partir de ce petit nombre d'éléments, ce qui n'empêche pas

qu'elle présente un nombre immense de compositions et de propriétés différentes grâce aux regroupements et mélanges d'atomes que la nature, ou l'homme, réalisent.

Il faut d'abord citer ces regroupements stables d'atomes que sont les molécules. Ainsi deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène s'unissent volontiers, s'accrochant ensemble pour former une molécule d'eau, très stable, qu'on désigne tout naturellement par H₂O. C'est la mise ensemble d'un nombre immense de ces molécules toutes identiques qui constitue l'eau (voir page 171 et ci-dessous). De même, l'union de trois atomes d'oxygène donne naissance à la molécule d'ozone, O₃. De telles molécules à trois atomes forment, dans l'espace, un petit triangle dont les sommets sont les trois atomes constitutifs. À partir de quatre atomes, une molécule n'a plus de raison d'être plane. Certaines des molécules que nous utilisons dans les



Deux molécules simples :
à gauche, la molécule H_2O est un assemblage de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène formant à eux trois un triangle isocèle quasi rectangle.
à droite, la molécule de méthane (CH_4) est un assemblage de quatre atomes d'hydrogène situés aux sommets d'un tétraèdre régulier et d'un atome de carbone au centre du tétraèdre.

matériaux (notamment plastiques) peuvent regrouper non pas deux ou trois, mais des centaines de milliers d'atomes et avoir des formes d'une grande complexité.

Quant aux mélanges d'atomes, ou de molécules, ils donnent lieu, comme lorsqu'on mélange de l'eau et du vin, ou de l'eau qu'on verse dans de l'huile, à une quasi-infinité de substances aux propriétés variées. Ce sont des alliages (cas des métaux) ou des composés. Ainsi, l'acier est un alliage de fer avec un peu (environ un pour cent) de carbone. Il a des propriétés (rigidité, corrosion...) bien meilleures que le fer pur. L'acier inoxydable (ou « inox ») est quant à lui un alliage de fer, de nickel et de chrome. Le bronze est un alliage de cuivre et d'étain. Dans ces alliages, les atomes (par exemple de fer, de nickel et de chrome) sont mélangés un peu comme le sont des billes noires, rouges et vertes dans un sac de billes. Beaucoup de situations peuvent alors se présenter, notamment celle d'un mélange aléatoire où les billes sont réparties au hasard, mais aussi celle de regroupements partiels où certaines billes, noires par exemple, auraient tendance à se regrouper entre elles.

Face à la variété et à la complexité des cas possibles, commençons par le début et

rappelons quelques données indispensables sur l'atome lui-même.

Les atomes

Nous nous contenterons ici de décrire l'atome comme une petite boule de matière, que nous considérerons comme sphérique. Cette boule est minuscule puisque, mises en ligne de telle sorte qu'elles se touchent, il en faudrait environ soixante millions (la population de la France) pour constituer une ligne d'un centimètre, ce qui correspond à un diamètre d'environ 2 Angström (soit 2×10^{-10} m).

Regardons cette boule de plus près. En fait, elle est constituée d'une partie centrale, extrêmement petite, le noyau (environ dix mille fois plus petit encore que l'atome!), et d'une sorte de « brouillard » de particules infinitésimales en mouvement (immensément rapide) autour du noyau, les électrons. Ce sont eux qui donnent à l'atome à la fois sa forme quasi sphérique et sa taille globale. Ce qui importe ici, c'est que d'un élément à l'autre (du cuivre au fer par exemple) c'est le nombre d'électrons – lequel définit le numéro atomique – qui varie. Ainsi l'atome d'hydrogène possède 1 électron, l'atome de plomb en possède 82 (voir plus haut). Malgré

ce nombre d'électrons très différent d'un atome à un autre, les atomes ont des tailles peu différentes les unes des autres.

Mais il se trouve que chaque électron est porteur d'une charge électrique élémentaire - e négative. Pour que l'atome - et donc toute la matière qui nous entoure - soit électriquement neutre (ce qui est le cas le plus général), il faut donc qu'une charge positive équivalente existe sur le noyau, qui neutralise globalement celle des électrons. Cela est réalisé grâce à la présence, dans le noyau, d'un certain nombre de protons, particules qui portent chacune la charge électrique + e. Si donc le nombre de protons dans le noyau d'un atome est égal au nombre d'électrons de cet atome, et donc égal au numéro atomique, alors l'atome est neutre. Qui plus est, les charges positives des protons attirent les charges négatives des électrons, donnant sa stabilité globale à l'atome : les électrons sont maintenus à proximité du noyau par cette force (force de Coulomb), qui lie les charges positives aux charges négatives.

Nous pouvons donc maintenant énoncer ce qui suit :

Un atome, de numéro atomique Z, est constitué d'un noyau central qui

contient Z protons portant chacun la charge positive + e, et de Z électrons - dits périphériques dans la mesure où ils circulent autour du noyau - portant chacun la charge négative - e (voir la figure ci-dessous). On ajoutera ici, sans que cela ait de grandes conséquences pour la suite, que le noyau comporte aussi des particules électriquement neutres, agglutinées aux protons, et appelées neutrons. Le noyau a, au cœur de l'atome, une taille minuscule. Quant au brouillard - ou nuage électronique - il constitue le volume principal de l'atome et il est relativement mou et compressible. Si on lui retire un (ou N) électron(s), l'atome devient chargé positivement une (ou N) fois : on dit que c'est un ion.

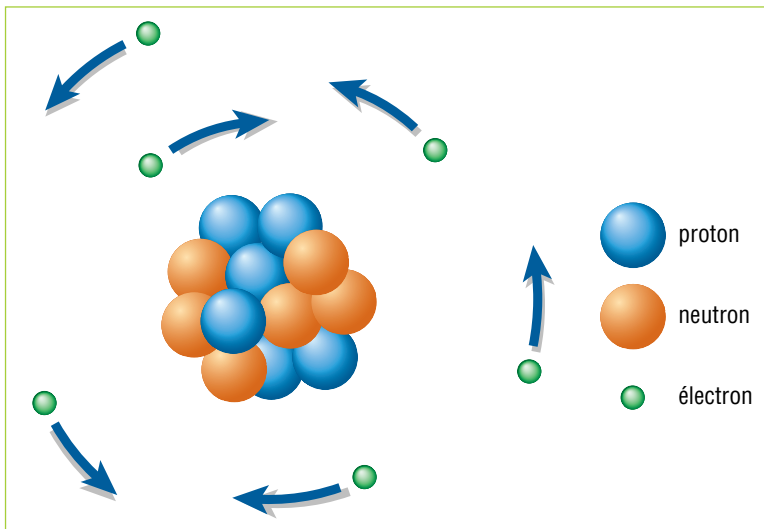
Un matériau donné peut alors être constitué :

- soit d'atomes de même nature empilés les uns contre les autres (exemples : les métaux purs ; le soufre ; le diamant...)
- soit d'atomes de natures différentes empilés les uns contre les autres (exemple : l'acier inox, empilement d'atomes de fer, de nickel et de chrome ; le laiton, empilement d'atomes de cuivre et de zinc...)
- soit de molécules empilées les unes à

côté des autres (exemples : la glace, empilement de molécules d'eau ; les polymères ou matières plastiques, empilements de molécules polymériques...)

- soit d'un mélange d'atomes et de molécules empilés (exemple : bon nombre de céramiques et de minéraux...)

Un atome de carbone comprend un noyau, agglomérat de six protons et de six neutrons, autour duquel évoluent six électrons. La taille relative du noyau est, ici, très amplifiée.



– soit d’une juxtaposition de matériaux différents (exemple : le granite, agrégation de « grains » de feldspath, de quartz et de mica, tous en général visibles à l’œil nu...).

Au cours des changements d’état de la matière, les atomes ou les molécules de la matière considérée demeurent inaltérés. Seule la manière dont ils sont liés l’un à l’autre varie. Dans les gaz, ils sont totalement séparés et indépendants les uns des autres. Dans les liquides, ils sont au contact, mais, peu liés les uns aux autres, ils glissent les uns sur les autres avec une grande facilité. Dans les solides, ils sont au contact et occupent des places fixes qu’ils ne peuvent quitter que difficilement.

Ci-dessous, nous parlerons exclusivement des solides.

Les empilements cristallins

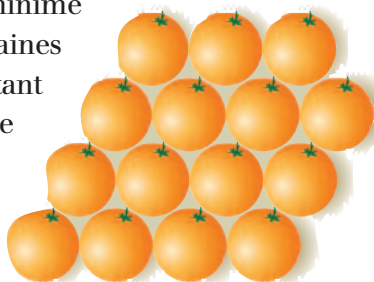
Imaginons d’abord le cas en principe le plus simple, celui où l’on empile des atomes de même nature, par exemple de cuivre, pour obtenir un morceau (macroscopique) de cuivre. Compte tenu des tailles d’atomes mentionnées plus haut, on calculera sans peine que, pour obtenir un centimètre cube de cuivre, il faut rassembler environ 5×10^{22} , soit cinquante mille milliards de milliards d’atomes. Mais que ce nombre soit immense n’empêche pas de raisonner sur des nombres plus petits : l’empilement est de même nature pour une partie minime isolée par la pensée (quelques centaines d’atomes) ou pour le tout, celui-ci étant la prolongation dans l’espace de celle-là.

Empiler des atomes, cela ressemble, aux tailles près, à empiler des billes, ou des balles de ping-pong, ou des oranges... Il est clair que, si nous n’y prenons pas

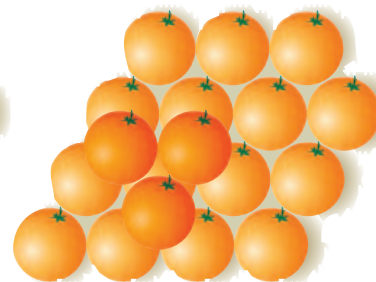
garde, l’empilement sera désordonné, comme l’est un tas de mirabelles, dans le verger, après cueillette. Mais au prix d’un peu de méthode et d’ordre, nous pouvons parfaitement réaliser des empilements ordonnés, comme sait le faire le marchand d’oranges sur son étal. C’est en fait à l’image de ce marchand que la nature opère.

Comme dans le cas des oranges, on commence à former une couche plane, suivant une disposition hexagonale (voir la figure ci-dessous) qui leur assure une compacité maximale. Puis une seconde couche atomique plane, elle aussi hexagonale, identique à la première, s’installe sur celle-ci, puis une troisième sur la seconde... jusqu’à ce qu’un édifice à trois dimensions soit constitué.

Si l’empilement a été bien réalisé, il se présente de manière aussi ordonnée, dans l’espace, que peuvent l’être les effigies de Marianne sur une feuille de timbres... On y décèle sans peine des lignes droites, ainsi que des angles caractéristiques (comme 60° , ou 120° , dans l’empilement hexagonal). On définit ces empilements comme périodiques, en ce sens qu’un motif donné (la figure de Marianne par exemple) se répète périodiquement, identique à elle-même, et indéfiniment (jusqu’à la limite de la feuille) par des opérations de translation. Un tel empilement périodique d’atomes s’appelle un CRISTAL.



a) Oranges empilées sur un plan en disposition hexagonale.



b) Les mêmes et trois oranges (d'une couleur plus foncée) du plan juste supérieur.

Il est bon de remarquer que la science de ces empilements ordonnés d'atomes (et, plus généralement, de molécules), appelée la cristallographie, a été découverte par une démarche qui s'apparente de si près à celle de *La main à la pâte* qu'elle mérite d'être racontée ici.

L'histoire se passe dans les années 1780. L'abbé Haüy, en visite chez un ami collectionneur de minéraux, observe un échantillon de calcite et, malencontreusement, le laisse choir. L'échantillon se casse en « mille » morceaux. L'abbé, confus, les ramasse mais, se gardant bien de les jeter, les ramène chez lui et les observe. Étrange ! Tous se présentent sous la forme de petits polyèdres, de tailles et de formes variées, mais dont les angles entre arêtes sont identiques. À l'aide d'un marteau, il continue à casser les morceaux jusqu'à ne plus pouvoir les observer que sous un microscope. Aussi minuscules soient-ils, il remarque que les angles, mesurés à l'aide d'un rapporteur, demeurent les mêmes.

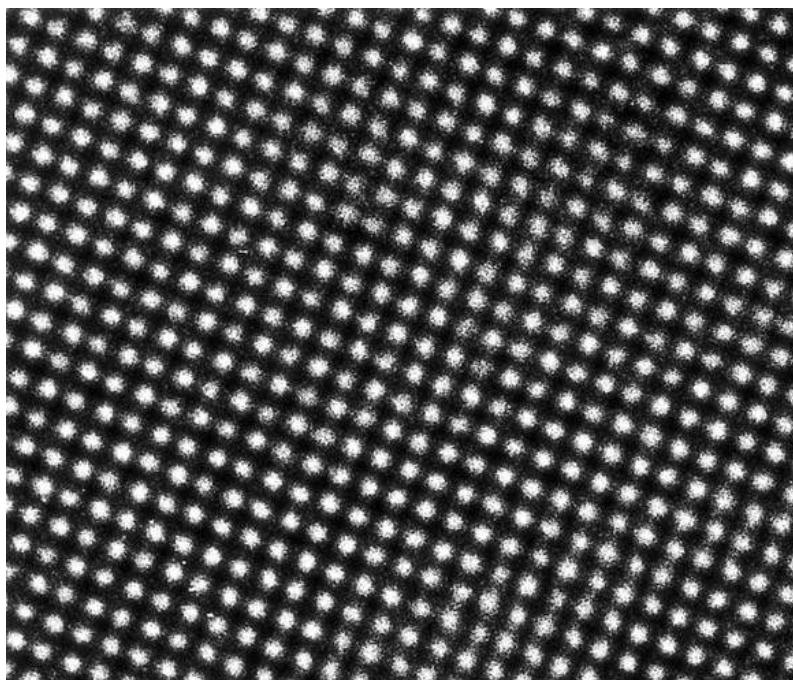
L'expérience, qui a suivi l'observation, est

terminée. Vient le temps de l'argumentation et de l'intuition. « Si je pouvais continuer ainsi jusqu'au plus petit morceau possible, c'est-à-dire celui de taille quasi atomique, pense-t-il, et en supposant que les angles entre arêtes demeurent ainsi constants, alors j'aboutirais à un hexaèdre final, minuscule mais d'angles identiques à ceux que j'observe macroscopiquement. » Inversement, c'est en empilant ces hexaèdres (qu'on appelle « mailles primitives ») que l'on reconstitue le solide macroscopique. Il est normal, dans ces conditions, de retrouver à cette échelle les angles caractéristiques de l'hexaèdre de départ.

La constitution des solides cristallins vient ainsi d'être découverte. Qu'il nous suffise, pour la suite, d'en retenir les points suivants :

– les matériaux cristallins atomiques (comme le cuivre) sont constitués d'atomes empilés dans un ordre spatial rigoureux. Nous en avons examiné un type (obtenu par empilement de plans hexagonaux) dans le cas du cuivre, mais il existe beaucoup d'autres « systèmes

cristallins » (voir les photos page 184). Dans tous les cas, la structure fait apparaître des plans, ainsi que des droites (des axes), d'atomes. Cette description d'un cristal en plans ordonnés empilés est analogue à celle qu'avait proposée Haüy. Dans le cas du cuivre, la « brique » élémentaire, c'est-à-dire la maille primitive de l'empilement est un petit

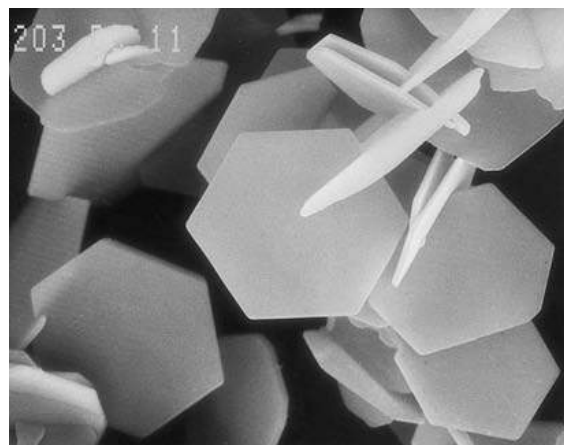


Échantillon de molybdène vu par microscopie électronique. Chaque point blanc représente un atome. On observe le caractère périodique de l'empilement. Grossissement : 13×10^6 .

rhomboèdre (parallélépipède composé de six losanges identiques). « Bâti » le cristal de cuivre macroscopique, c'est empiler ces briques les unes sur les autres, à trois dimensions, chaque rhomboèdre comportant un atome de cuivre.

Plutôt que des rhomboèdres (cas du cuivre) on pourra sans doute mieux se représenter ces empilements en imaginant une maille primitive qui soit un cube. En empilant ces cubes avec soin, on obtient finalement un objet de forme quelconque mais où – comme Haüy sur ses morceaux brisés de calcite – on retrouve partout, sur les arêtes externes, des angles identiques (ici, droits).

Tout ce qui vient d'être dit des atomes peut être généralisé aux molécules. Ainsi, dans le cas de la glace, les objets dont nous devons considérer l'empilement sont les

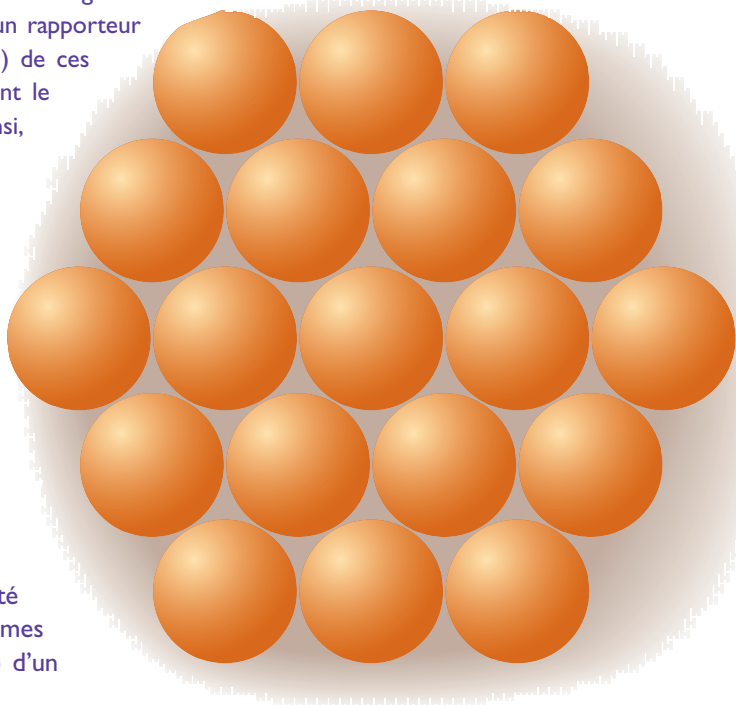


Cristaux d'alumine. Ces cristaux se présentent ici en petites plaquettes enchevêtrées, de forme hexagonale. Les arêtes de l'hexagone central mesurent 8 μm , soit 8 millièmes de millimètre.
© Société ATOCHEM

molécules H_2O . Ce sont elles qui, au moment de la solidification (que nous appellerons donc aussi « cristallisation »), prennent



Les enfants construisent un empilement de balles de ping-pong sur la table. Ainsi, avec 19 balles, ils peuvent construire un hexagone régulier dont chaque côté comporte 3 balles (voir figure). Ils maintiendront le tout par des réglettes disposées sur les côtés de l'hexagone. Ils pourront y observer plusieurs hexagones réguliers constitués de 7 balles (6 formant un petit hexagone élémentaire, et 1 au centre) et mesurer avec un rapporteur les angles caractéristiques (60° et 120°) de ces hexagones. À partir de là, ils élaboreront le plan suivant, au-dessus du précédent. Ainsi, avec 12 balles supplémentaires, disposées dans les « cuvettes » triangulaires du premier plan, on voit se constituer le second plan, lui aussi hexagonal, et identique au précédent; puis sur le deuxième, le troisième. On remarquera qu'il y a deux façons distinctes de disposer le troisième plan sur le second: ou à la verticale (boule à boule), ou non, du premier. On fera remarquer aux enfants que les balles se disposent en lignes droites, réparties dans l'espace, ainsi qu'en plans successifs, et que cette propriété doit être vraie aussi pour les atomes (si du moins ce mot a été prononcé) d'un cristal.





- Il est facile de montrer aux enfants des cristaux en cours de formation. Il suffit pour cela de disposer dans une coupelle en verre de l'eau très salée (saumure), puis de chauffer légèrement la coupelle sous un microscope, ou une loupe, ce qui permet de voir des cristaux de sel (chlorure de sodium) croître dans la solution. On fera surtout remarquer aux enfants que tous ces cristaux présentent des formes marquées par l'angle droit, signe externe de ce que la brique élémentaire peut être ici un cube.
- Si l'on dispose d'un microscope, ou d'une bonne loupe, il est simple de reproduire l'« expérience » de Haüy.
 - On se procurera un cristal naturel (comme la calcite ; ou tout simplement du « gros sel ») et on le fera casser par les enfants à l'aide d'un marteau. Ils observeront, en les mesurant, les angles caractéristiques des morceaux brisés et constateront que, dans la plupart des cas, ces angles se retrouvent sur tous les morceaux, signe d'une propriété caractéristique « interne » de ces cristaux (angles droits pour le chlorure de sodium).

des positions ordonnées qui obéissent à la périodicité des cristaux.

Dans un cristal, chaque atome est lié à ses voisins par des forces d'origine chimique (forces dites « de liaison ») : c'est pourquoi le cristal possède de la rigidité, et ne se désagrège pas spontanément en ses atomes constitutifs. Aussi, si l'on exerce un effort extérieur de traction, celui-ci se répercute sur chaque atome, qui est ainsi sollicité de s'éloigner de ses voisins tandis que les forces de liaison s'y opposent. Il en résulte, à l'équilibre de ces deux forces opposées, un léger écartement de chaque paire d'atomes voisins. Ces écartements de tous les atomes avec tous leurs voisins donne lieu, macroscopiquement, à l'allongement élastique (voir page 172). Si l'effort de traction est supprimé, chaque atome reprend sa position initiale, restituant à la longueur de l'échantillon sa valeur initiale (l'élasticité est bien un phénomène réversible).

Les empilements amorphes

Il arrive que, pour tel ou tel matériau, la nature choisisse d'empiler les atomes, ou les molécules, de manière désordonnée, plutôt que périodique : ce matériau est dit amorphe. Il est tentant de penser l'état amorphe, désordonné, comme plus fréquent que l'état cristallin où règne l'ordre. Il n'en est rien : la matière, notamment minérale, qui nous entoure sur Terre est beaucoup plus souvent cristalline qu'amorphe.

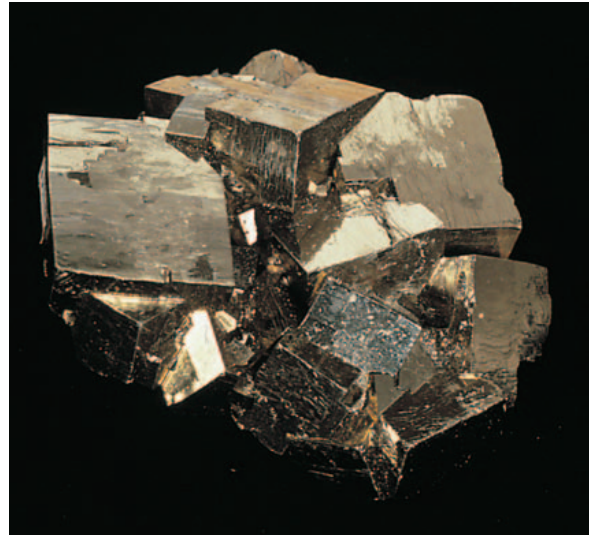
On peut deviner – en se représentant des balles de ping-pong placées en désordre dans un sac – qu'elles occupent plus de volume que si elles étaient disposées en ordre. Effectivement, lorsqu'un matériau donné existe dans les deux états, cristallin et amorphe (cas de certains alliages comme le fer-bore), ce dernier a une densité plus faible que celle du cristal. La différence peut atteindre dix pour cent.

En fait l'ordre spatial obtenu en constituant des plans de balles hexagonaux et en superposant ces plans les uns sur les autres, comme indiqué au paragraphe précédent, est celui qui conduit à l'arrangement le plus « compact », c'est-à-dire à celui qui présente la densité maximale. Cette propriété, que nous venons de pressentir intuitivement, devrait pouvoir être démontrée. Mais cette démonstration est si ardue qu'elle n'a pas encore été trouvée par les mathématiciens !

Un cas particulièrement familier de l'état amorphe est celui du verre, où des molécules, notamment de « silice » (de formule SiO_2 , oxyde de silicium), sont empilées de manière désordonnée. De ce fait, lorsqu'on le chauffe, il se ramollit avant de devenir franchement liquide (ce qui permet de le mettre en forme : « art du verrier »). Il ne présente pas de fusion franche (contrairement à la glace, ou au plomb... voir pages 172-173, qui passent sans transition d'un état solide à un état liquide).



Calcite de Cumberland (Royaume-Uni).
Système rhomboédrique. Longueur : 6,5 cm.
© ENSMP Musée, photo Monique Claye.



Pyrite de Niccioleta (Italie).
Système cubique. Longueur : 13 cm.
© ENSMP Musée, photo Monique Claye.



Andalousite de Fraxennar, Bavière (Allemagne).
Système orthorhombique. Longueur : 10 cm.
© ENSMP Musée, photo Monique Claye.



Pyrrhotite de Chihuahua (Mexique).
Système hexagonal. Longueur : 12 cm.
© ENSMP Musée, photo Monique Claye.

Une autre configuration amorphe importante est celle des matériaux polymères (exemples : les « plastiques », les gels...). Dans ce cas, l'objet élémentaire est une molécule souvent linéaire (longue « chaîne » d'atomes liés chimiquement les uns aux autres, comme le polyéthylène, le polystyrène...). Ces chaînes, flexibles, s'entremêlent les unes aux autres à la manière d'une pelote de brins de

laine enchevêtrés. Il n'y a bien sûr pas d'ordre cristallin dans ce cas. La fréquente flexibilité du matériau macroscopique est directement liée à celle des molécules individuelles et à la possibilité qu'elles ont de glisser les unes sur les autres dans l'enchevêtrement, phénomènes brillamment étudiés par Pierre-Gilles de Gennes.

Mentionnons enfin le cas du bois, dont n'est pas très éloigné celui du papier. Ici des molécules organiques extrêmement complexes, allongées, différentes d'une espèce à une autre, forment un enchevêtrement serré conférant au bois sa rigidité en même temps que sa texture en fibres.

Cet enchevêtrement laisse libres des interstices microscopiques, dans lesquels de petites molécules, comme les molécules d'eau, peuvent s'introduire. C'est ainsi que de l'eau peut pénétrer « à cœur » dans certains bois ainsi, bien entendu, que dans le papier ou le carton, voire passer au travers d'eux (cas des filtres en papier).

Agitation thermique

Nous allons, ici, introduire intuitivement les notions de température et de chaleur.

Pour un matériau cristallin, tel que le cuivre, un atome donné est placé en un site bien précis, où il est entouré de 12 atomes « proches voisins » (6 dans le plan, voir page 180, 3 au-dessus et 3 au-dessous), formant une sorte de cage dans laquelle le premier atome est comme emprisonné. Chaque atome peut aller et venir dans sa cage, sans en sortir, repoussé qu'il est par ses douze proches voisins et effectuant de constantes oscillations. On aura de celles-ci une image en regardant une bille osciller dans le fond d'un bol.

Ces allers-retours atomiques évoquent aussi le mouvement d'un pendule, ou d'une balançoire. La durée d'une oscillation s'appelle la PÉRIODE. L'inverse de la période, c'est-à-dire $1/\text{période}$, s'appelle la FRÉQUENCE : c'est le nombre d'oscillations se produisant en une seconde. Dans l'exemple de la balançoire, une fréquence de $1/2$ (soit $1/2$ aller-retour par seconde) équivaut à une période de 2 secondes. Pour un atome,

la fréquence peut atteindre $10^{14}/\text{s}$ (soit cent mille milliards d'oscillations par seconde).

Ces oscillations emmagasinent, en elles, de l'énergie et notamment de l'énergie cinétique, celle qui ne dépend, pour un objet mobile (ici, l'atome), que de sa masse et de sa vitesse. Il se trouve que plus un matériau est « chaud », plus est grande l'énergie ainsi stockée en lui dans la myriade de ses atomes en oscillation, encore appelés « oscillateurs ». Nous énoncerons donc que la chaleur contenue dans un corps est directement reliée à l'énergie, plus ou moins grande, contenue dans ses oscillateurs.

Mais au fait, qu'appelons-nous, pour un corps, « être chaud » ? Certes, une sensation physique, complétée par une mesure thermométrique, nous renseigne là-dessus. Mais comment convient-il de distinguer chaleur et température ? Imaginons pour cela que nous mettions en contact deux morceaux de cuivre (nous prenons pour simplifier deux éléments d'un même matériau, mais on pourrait généraliser ce qui va être dit au cas de deux substances différentes, cristallines ou non, solides ou non). Supposons-les dans des états différents, les oscillateurs du morceau 1 contenant chacun, en moyenne, plus d'énergie que ceux du morceau 2. Au contact entre 1 et 2, vont se produire des chocs (comme entre des boules de billard de vitesses différentes) entre les atomes de 1 et les atomes de 2. Ceux qui ont plus d'énergie (et, en particulier, des vitesses supérieures) vont alors céder une partie de celle-ci à ceux qui en ont moins, jusqu'à ce que ces énergies s'équilibrent entre 1 et 2. Nous dirons que de la chaleur a été transmise de 1 à 2. La notion de température s'introduit alors en disant que si de la chaleur passe d'un corps A à un corps B, c'est que la température de A est supérieure à celle de B. Ainsi donc,

dans notre exemple, le cuivre 1 avait au départ une température T_1 supérieure à celle du cuivre 2, T_2 . Au bout d'un certain temps, les deux morceaux de cuivre auront la même température intermédiaire entre T_1 et T_2 . C'est aussi, bien sûr, ce qui se passe lorsque nous mélangeons deux liquides de températures différentes.

Notons ici que la chaleur contenue dans un corps est évidemment proportionnelle à la quantité de matière, c'est-à-dire à la masse du corps. Par exemple, si nous chauffons à 80°C une aiguille d'acier de 1 gramme et une poutrelle d'acier de 1 tonne, l'aiguille et la poutrelle ont la même température, 80°C , car les atomes de fer ont une même amplitude moyenne d'oscillation. Par contre, la chaleur contenue (et récupérable par exemple pour chauffer de l'eau) est un million de fois plus grande dans le second cas que dans le premier.

Il est courant que la température augmente lorsque de la chaleur est apportée, mais ce n'est pas toujours le cas : ainsi avons-nous rappelé plus haut que, lorsque la glace fond, la température du mélange eau-glace demeure constante jusqu'à totale fusion de la glace, ce qui correspond à un apport de chaleur sans modification de la température.

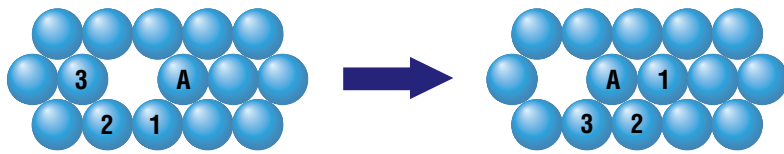
Diffusion et corrosion

Nous l'avons vu (page 174), de l'oxygène peut pénétrer – ce qui suppose un mouvement – dans un matériau et le corroder. Ce qui est vrai de l'oxygène est vrai de tout autre atome : ainsi, dans un acier inox, un atome de nickel (ou de chrome, ou de fer) se déplace, parfois sur de grandes distances, avec une vitesse qui est d'autant plus grande que la température de l'acier est plus élevée. Se pose aussitôt la question suivante : un atome donné étant enfermé à l'intérieur d'une cage (voir page précédente) dans laquelle il

oscille mais dont il ne peut, en principe, pas s'échapper, comment de tels mouvements sont-ils possibles ?

L'antique jeu de taquin nous donne la réponse. Considérons, dans un cristal, un atome donné, noté A sur la figure ci-dessous. Si les 12 atomes formant sa cage sont présents, il ne peut en effet se déplacer. En revanche, si l'un de ses proches voisins est absent (ici sur sa gauche), alors il peut « sauter » dans cette place vacante (ici vers la gauche). Que l'atome noté 1 saute alors sur la place laissée libre par A, puis que l'atome 2 saute sur la place laissée libre par 1... et l'on retrouve bientôt la situation initiale (l'atome A avec une place vacante sur sa gauche) mais décalée d'une distance atomique vers la gauche. Autant de fois ce processus de taquin se reproduira, autant de chemin vers la gauche aura parcouru l'atome A dans le cristal.

Dans ce qui précède, la gauche ne joue aucun rôle particulier. On pourra s'assurer, par exemple en disposant une vingtaine de pièces de 1 euro en arrangement hexagonal et en laissant vide l'un des sites, puis en spécifiant l'une des pièces, que celle-ci peut se diriger « en taquin » dans n'importe quelle direction. On dit alors qu'elle effectue un mouvement aléatoire, ou encore brownien. De même, dans un cristal, un atome (ou une molécule) se propage-t-il en divaguant de la sorte, et ce mouvement brownien est appelé diffusion. Au cours de cette diffusion, un atome donné peut « revenir sur ses pas » et revisiter des sites qu'il a antérieurement occupés. On s'attend donc à ce que son déplacement, au bout d'un certain temps, soit moindre que s'il était allé en ligne droite. De toute manière, il est imprévisible, et l'on ne peut décrire quantitativement la diffusion atomique qu'en calculant des



(on dit souvent « plastiques ») dans la mesure où, au-delà de la déformation élastique, ils subissent une déformation permanente sous l'action d'un effort extérieur.

moyennes sur un très grand nombre d'atomes en mouvement.

La configuration créée par l'absence d'un atome sur un site normalement occupé et qui joue un rôle essentiel dans ce qui précède, s'appelle une lacune. La présence de lacunes constitue une certaine forme de désordre à l'intérieur de l'ordre quasi parfait du cristal. Ce type de désordre a un nom, en physique : défini de façon plus précise, il s'appelle l'ENTROPIE, et on le rencontre dans de nombreux autres cas. Dans tout arrangement, spatial ou autre, une certaine quantité d'entropie (du grec *entropia* qui signifie : « retour en arrière ») est nécessaire pour assurer la stabilité de l'arrangement. Nous pouvons donc prévoir que des lacunes existent toujours, dans tout matériau, rendant ainsi possible la diffusion.

Tout phénomène lié à la diffusion atomique voit son intensité augmenter lorsque la température croît, car alors augmentent et le nombre de lacunes et l'amplitude des oscillations atomiques, rendant plus facile le saut élémentaire d'un atome dans une lacune proche voisine. Ainsi en va-t-il de la corrosion, mais aussi de certaines propriétés des alliages. Celles-ci peuvent en effet évoluer fortement si la température augmente, la diffusion modifiant la position originelle des atomes dans l'alliage, et donc, souvent, ses propriétés.

Propriétés mécaniques

On se rappelle (page 179) que les métaux et les alliages sont, le plus souvent, malléables

L'expérience a montré, dès le siècle dernier, que la déformation se faisait très généralement par glissement de blocs entiers de matière (blocs qui peuvent avoir des dimensions d'une dizaine de microns, c'est-à-dire du centième de millimètre), un bloc semblant glisser sur le bloc voisin le long d'un plan les séparant (voir la figure page suivante). Il n'a pas fallu longtemps pour comprendre que ces plans, dits plans de glissement, n'étaient autres que les plans les plus denses de la structure cristalline. Dans le cas d'un cristal de cuivre (voir plus haut), ces plans denses sont précisément les plans hexagonaux, ceux que nous avons dessinés.

Que vient faire ici la densité des plans ?

La réponse est simple. Le matériau ayant une densité donnée quelle que soit la façon dont on regarde la structure cristalline, les plans les plus denses – ceux qui ont le plus grand nombre d'atomes par unité de surface – sont forcément aussi ceux qui sont les plus éloignés de leur plan voisin parallèle.

Il en résulte que, étant les plus éloignés les uns des autres, les plans les plus denses du cristal sont (du moins intuitivement) les moins bien liés les uns aux autres. C'est donc, assez normalement, le long de ceux-là que les liaisons entre atomes, lesquelles assurent la cohésion du cristal, « lâchent » en premier sous l'effet d'un effort extérieur.

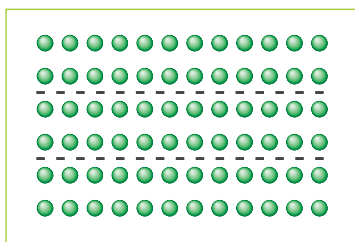
On conçoit enfin qu'une élévation de température, amplifiant l'agitation thermique et la diffusion atomique, ait tendance à favoriser le glissement et plus généralement la déformation plastique. On comprend ici ce qui a été dit plus haut (l'« art du forgeron », page 179).

Ces glissements ne se font pas sans difficultés, quels que soient les types d'empilement. Nous avons déjà parlé du désordre, et l'on conçoit que celui-ci, s'il existe, puisse soit favoriser le glissement (désordre particulier appelé *dislocation*), soit le freiner, c'est-à-dire gêner la déformation, et donc durcir le matériau. Mais on devine aussi que la déformation est – elle-même – capable d'induire du désordre. Si ces deux intuitions sont bonnes, il en résulte que la déformation doit s'accompagner d'un durcissement. C'est bien ce qui se produit (voir page 179) : c'est le phénomène, connu depuis des siècles, de l'écroutissage.

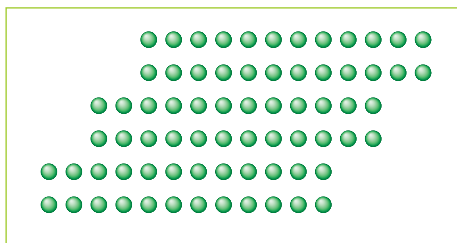
En résumé, lorsqu'on exerce un effort croissant sur un matériau, la suite des événements suivants peut se produire.

À faible effort, les atomes s'éloignent légèrement les uns des autres, proportionnellement à l'effort appliqué et reviennent à leur position de départ si l'effort est supprimé : on est dans le régime de l'élasticité.

Au-delà d'une valeur-seuil de l'effort, des plans denses peuvent se mettre à glisser les uns sur les autres. À suppression de l'effort,



a) avant glissement



b) après glissement le long des deux plans marqués par des pointillés.

l'ordre cristallin est conservé, mais pas la forme de l'échantillon comme entre les formes *a* et *b* ci-dessous : il y a déformation (permanente), et celle-ci est favorisée par une élévation de température. Le matériau devient plus dur au fur et à mesure que la déformation se développe. Au-delà d'une certaine déformation (parfois considérable : cas du laminage des feuilles minces d'aluminium), le matériau finit par casser.

Il se peut aussi que le glissement soit si difficile – par exemple en raison de l'intensité des liaisons entre atomes, ou de l'absence de plans denses dans les amorphes – que la déformation ne se produise pas, ou presque pas. Ce cas correspond assez bien à celui des matériaux que nous avons appelés durs (voir page 172). Ne se déformant pas, ils ne peuvent, finalement, que casser : ils sont fragiles.

La conduction

S'il n'a guère été question des électrons jusqu'à présent, ils seront sur le devant de la scène dans ce qui suit.

Considérons un échantillon d'un métal, par exemple du groupe IA (voir le tableau périodique page 177), comprenant *N* atomes identiques. Les atomes (chacun avec son noyau et ses électrons) ont adopté un arrangement spatial, par exemple cristallin, et s'y tiennent. Dans le cas de notre métal, chaque atome se débarrasse d'un de ses électrons. Celui-ci, perdant toute mémoire de l'atome dont il est issu, se meut dans tout le volume de l'échantillon. S'il en est ainsi, l'atome initialement neutre porte désormais une charge positive (celle d'un proton, non compensée par celle de l'électron absent). Cet « atome positif » est un ion (voir page 179) et sa charge est $+e$. Chaque atome ayant subi la même aventure, l'échantillon comprend désormais :

– un édifice cristallin de N ions, pratiquement immobiles, sauf qu'ils oscillent chacun autour de son site, chacun portant la charge $+e$;

– un ensemble de N électrons, chacun de charge $-e$, en sorte que l'échantillon est électriquement neutre, comme il l'était au départ. Ces N électrons sont désormais délocalisés sur l'ensemble du volume, dans lequel ils circulent librement, un peu comme les molécules de gaz dans un bocal. Ils sont caractérisés chacun par son énergie cinétique (celle qui ne dépend, pour un objet en mouvement, que de sa masse et de sa vitesse), ignorent en grande partie les ions, et rebondissent sur les surfaces par l'intérieur en sorte qu'ils restent enfermés dans l'échantillon : on leur donne le nom d'électrons libres (libres par rapport aux atomes) et l'on parle parfois du « gaz d'électrons libres », pour évoquer leurs trajectoires quasi aléatoires.

Tout ce qui vient d'être décrit concerne les métaux (et les alliages métalliques) mais ne s'applique ni aux semi-conducteurs ni à l'ensemble des isolants.

Supposons maintenant, afin de revenir sur la conduction thermique (voir page 175), que l'on chauffe une paroi de l'échantillon d'un métal. Au rebond sur cette paroi, les électrons libres peuvent donc acquérir un supplément d'énergie cinétique (leur vitesse augmente). Repartant dans l'autre sens et arrivant sur la paroi opposée, ils peuvent, inversement, céder à celle-ci l'énergie, et donc la chaleur, qu'ils ont reçue de la première, puis recommencer leur va-et-vient, et ainsi de suite. Capables, de la sorte, de transporter de la chaleur d'une paroi à l'autre, les électrons libres apparaissent donc, dans les métaux, comme les principaux agents caloporteurs. Leur existence explique que les métaux

soient les meilleurs conducteurs thermiques connus. Qu'en est-il alors de la conduction électrique ?

Les électrons libres d'un métal peuvent être soumis à la force électrique qu'exerce sur eux un champ électrique.

Cette force s'exerce identiquement sur tous les électrons libres (sur les autres aussi, mais ils demeurent fixés à leurs ions). Dans le cas d'un métal placé entre le pôle $-$ et le pôle $+$ d'une pile, les électrons libres sont tirés par la force électrique vers le pôle $+$ de la pile. Subissant par ailleurs une force inverse de friction de la part des ions, qui freinent leur mouvement, ils ne s'accélèrent que très momentanément et finissent rapidement par avoir une vitesse constante (et identique pour tous) dite d'« entraînement ». À ce mouvement d'ensemble de tout le gaz d'électrons libres correspond un courant électrique dont on ne s'étonnera pas ici qu'il soit d'autant plus faible que la friction mentionnée plus haut est plus forte, celle-ci dépendant de la nature des ions, donc du métal considéré (effet qui se mesure en termes de conductibilité électrique du métal) ; ni qu'il extériorise la friction subie, dont il vient d'être question, par un dégagement de chaleur (effet Joule).

La loi expérimentale de Wiedemann et Franz (voir page 176) – plus la conductivité électrique est grande, plus la conductivité thermique est grande – prend maintenant une signification simple. Les métaux bons conducteurs de la chaleur (comme l'argent) sont bons conducteurs d'électricité. Inversement, les mauvais conducteurs de la chaleur (comme l'acier inox) sont des mauvais conducteurs de l'électricité. Puisque ce sont les mêmes « agents » (les électrons libres) qui, dans un métal, transportent la chaleur et l'électricité, il ne faut pas s'étonner qu'ils le fassent aussi bien ou aussi mal pour

l'un et pour l'autre, ce qui explique que les valeurs numériques des conductibilités électrique et thermique d'un métal donné (à une température donnée) soient pratiquement dans le même rapport pour tous les métaux.

Mais qu'appelle-t-on, alors, des isolants ?

Les métaux ont cette propriété de donner naissance à un « gaz » d'électrons libres. Les isolants sont l'ensemble des matériaux qui n'ont pas cette propriété. Ne possédant pas d'électrons libres, ils ne conduisent donc pas (ou pratiquement pas) le courant électrique. La plupart des minéraux, des polymères, nombre de céramiques... sont des isolants.

Et pourtant ces mêmes isolants conduisent – en général médiocrement, il est vrai – la chaleur. Y a-t-il contradiction avec ce qui précède ?

Revenons aux atomes, constitutifs du matériau. Nous savons qu'ils sont tenus entre eux par des forces dites de liaison. Ce lien leur permet de propager de l'énergie, comme le ferait un alignement de boules. Supposons ces dernières reliées chacune à la suivante par un ressort, celui-ci figurant assez bien le lien entre atomes dans le cristal. Heurtant la première, je vois se transmettre, de boule en boule, le choc – à peine atténué – de cette première à la dernière. Ces amples mouvements atomiques (qui se résolvent, pour chaque atome, en

oscillations locales, chacun demeurant dans sa cage) portent le nom de phonons. C'est par ces phonons (inaptes à conduire l'électricité, puisqu'ils n'induisent aucun mouvement de charges électriques) que les isolants conduisent la chaleur.

Des phonons existent aussi, bien entendu, dans les métaux, et y participent à la conduction de la chaleur, mais de façon assez secondaire en regard des électrons libres.

Il existe enfin des matériaux qui ne sont ni des métaux ni des isolants : ce sont les semi-conducteurs (dont le prototype est le silicium) lesquels jouent un rôle primordial dans toute l'électronique, constituant le matériau de base pour tous les composants d'ordinateurs. Les propriétés de conduction électrique y sont dominées par la température. En effet, si celle-ci est basse, le semi-conducteur se comporte comme un isolant. Lorsqu'elle croît, un certain nombre d'électrons se libèrent (grâce à l'agitation thermique) de leurs atomes : on voit ainsi apparaître un gaz d'électrons libres (ou « presque libres »), en nombre bien plus réduit que dans un métal, mais croissant lorsque la température augmente. La conduction électrique y est donc intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants, et elle croît quand la température augmente.

Et pour aller plus loin, quelques questions d'enseignants

Pourquoi, alors qu'ils sont constitués des mêmes éléments de départ, les matériaux sont-ils si différents ?

Les matériaux ne sont pas constitués des mêmes éléments. L'acier est un alliage de fer et de carbone, le graphite est du carbone, les plastiques sont constitués de molécules contenant, suivant les cas, du carbone, de l'oxygène, du chlore, etc.

Pourquoi les températures de fusion sont-elles différentes d'un matériau à l'autre ?

Les températures de fusion dépendent de la force qui relie les atomes (ou les molécules) du solide entre eux (elles). Plus la force est grande, plus la température de fusion est élevée.

La somme des masses des atomes constitutifs d'un corps est-elle équivalente à la masse de ce corps ?

Oui, la masse d'un corps solide est égale à la somme des masses des atomes qui le constituent. Il en est bien sûr de même pour un liquide ou pour un gaz.

Qu'en est-il des particules subatomiques de l'atome ?

Les protons et les neutrons, qui contiennent les noyaux des atomes, sont eux-mêmes constitués de particules plus petites, les quarks. Mais ces considérations ne jouent aucun rôle dans les propriétés des matériaux.

Qu'est-ce qu'un supraconducteur ?

Un supraconducteur est un matériau dans lequel la conductibilité électrique est infinie (ou la résistivité nulle). De ce fait, il n'existe aucune perte de chaleur par effet Joule lors du transport du courant électrique.

Malheureusement, ce phénomène est détruit par l'agitation thermique et ne se produit donc qu'à des températures bien inférieures à la température ordinaire. Aux températures de la vie courante, aucun matériau n'est supraconducteur (par exemple le plomb n'est supraconducteur qu'au-dessous de $-266\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Pourquoi le verre ou d'autres matériaux sont-ils transparents ?

On pourrait aussi bien poser la question : pourquoi les métaux, le bois, le granite... ne sont-ils pas transparents ?

Lorsqu'un grain de LUMIÈRE (grain appelé photon) tombe sur un matériau (mais c'est vrai aussi d'un liquide, ou d'un gaz) il peut, ou non, interagir avec les électrons du matériau. Une telle interaction cède tout ou partie de l'énergie du photon à ces électrons et celui-ci ne peut plus progresser : le matériau est opaque. Il existe des substances (comme le verre) où cette interaction n'est pas possible ; le photon passe alors au travers de la matière, laquelle est alors transparente.

Qu'est-ce qui peut traverser la matière ?

Les photons de lumière (voir plus haut) traversent la matière transparente mais non la matière opaque. Les photons de rayons X peuvent traverser de la matière opaque comme le corps humain.

Des particules chargées (comme des électrons, ou des protons...) peuvent, si leur vitesse est très grande, traverser de petites épaisseurs de matière. C'est aussi le cas des ions très rapides.

Les particules neutres (neutrons...), qui « ignorent », du point de vue électrostatique, les électrons ou les protons des matériaux, ont le plus souvent des « pénétrations » plus grandes. Parmi elles, les « neutrinos », notamment ceux envoyés par le Soleil, passent au travers de la Terre sans, en pratique, être absorbés ou défléchis.

Bibliographie

La structure de la matière, du bleu du ciel à la matière plastique, A. GUINIER, Hachette, 1980.

La matière à l'état solide, A. GUINIER et R. JULIEN, Hachette, 1987.

Yves QUERE, *Physique des matériaux*, Ellipses, 1998.

W. KURZ, J.-P. MERCIER, G. ZAMBELLI, *Introduction à la science des matériaux*, Presses polytechniques romandes, 1987.

Cette ressource est issue de l'ouvrage *29 notions clés pour savourer et faire savourer la science*, paru aux Éditions Le Pommier.



Le meilleur des Graines de sciences

Vous êtes enseignant, parent, éducateur... et vous manquez parfois de « munitions » pour répondre aux questions des enfants...

Or, en classe, à la maison, au centre de loisirs, celles-ci fusent : « Le Soleil va-t-il s'éteindre ? » « Est-ce qu'il y a des tremblements de terre sous la mer ? » « Où va l'eau qui tombe du ciel ? » « Pourquoi le ciel est-il bleu le jour ? » « Qu'est-ce que l'effet de serre ? » « Pourquoi les animaux migrent-ils ? » « C'est quoi le clonage ? »

Cet ouvrage de référence va vous aider à répondre à ce bombardement de curiosité... en toute connaissance de cause !

Fruit d'une rencontre entre des scientifiques et des enseignants, désireux de partager savoir et expérience, il est précisément conçu pour vous permettre d'acquiescer ou d'approfondir une culture scientifique, si précieuse pour appréhender le monde qui nous entoure... et pour l'expliquer !

Du Soleil à la cellule, du cycle de l'eau aux énergies renouvelables, de l'origine de l'homme au nanomonde, les 29 notions réunies dans ce volume constituent le bagage indispensable pour pérégriner, avec les enfants, en sciences, et ce, de la maternelle au collège. On les retrouve d'ailleurs dans le Socle commun de connaissances et de compétences, qui définit ce que l'école puis le collège doivent, en France, s'imposer de transmettre à tous les enfants.



Fondation *La main à la pâte*

43 rue de Rennes
75006 Paris
01 85 08 71 79
contact@fondation-lamap.org

Site : www.fondation-lamap.org

 FONDATION
La main à la pâte
POUR L'ÉDUCATION À LA SCIENCE