



Le carbone

IL NOUS ENTOURE !

Qu'il soit utilisé en tant que corps pur mais aussi et surtout en tant que corps composé, il est partout autour de nous. Même s'il vient seulement en quatorzième position dans la liste des éléments les plus présents sur terre (derrière l'oxygène et le silicium), il est le troisième élément le plus abondant dans l'Univers. Le carbone étant un élément si important, toute une branche de la chimie s'en occupe exclusivement : c'est la chimie organique (par opposition à la chimie inorganique, liée à l'étude des minéraux, des métaux, etc.). En fait, on retrouve cet atome dans beaucoup de composés car il forme très facilement des liaisons avec d'autres atomes qui se trouvent dans son entourage (il dispose de 4 électrons sur sa couche externe, et peut donc former jusqu'à 4 liaisons). On dit que le carbone a une grande affinité pour d'autres éléments.

LE CARBONE À L'ÉTAT PUR

D'un point de vue étymologique, le terme « carbone » vient du latin *carbo, carbonis* (littéralement charbon). En effet, la première forme de carbone jamais découverte (durant l'Antiquité) a été le charbon. Actuellement, cette source d'énergie représente moins de 5 % des sources d'énergie en France, mais plus de 40 % à travers le monde. Le pays le plus consommateur de charbon reste la Chine, avec plus de 1 300 millions de tonnes consommées chaque année. Le carbone à l'état pur existe sous plusieurs formes, qui ont chacune des propriétés et des utilisations très différentes : le carbone graphite, le carbone diamant, les fullerènes, les nanotubes.

LE CARBONE GRAPHITE

Structure
Les mines de crayon sont l'utilisation la plus connue du **carbone graphite** (Le terme graphite



provient du verbe grec *graphein*, qui signifie « écrire »). En fait, le graphite est composé de plans parallèles d'atomes répartis en hexagones. Chaque plan n'est que faiblement lié aux autres plans, donc il s'en détache facilement. En effet, la force de liaison entre atomes d'une même couche est proportionnelle à $1/r^2$, où

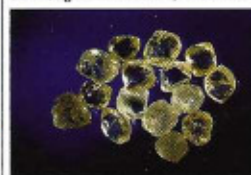
r représente la distance entre atomes, de l'ordre de l'angström. En revanche, la force de liaison entre chaque plan est une force dite de Van der Waals, proportionnelle à $1/r^6$, où r est la distance entre les plans du graphite (toujours de l'ordre de l'angström). La force de liaison entre les plans est donc plusieurs millions de fois plus faible que la force de liaison entre les atomes de carbone d'un même plan. C'est pourquoi le crayon laisse un dépôt, constitué de quelques couches de graphite sur le papier. Néanmoins, les crayons représentent moins de 2 % de l'utilisation totale du graphite, d'autres propriétés intéressantes étant utilisées au profit du monde industriel.

Propriétés et utilisations

Tout d'abord, chaque atome de carbone dans sa cristallisation en graphite possède un électron relativement libre : le graphite est donc bon conducteur d'électricité. C'est ainsi que le graphite est souvent le matériau utilisé pour constituer les balais des moteurs électriques, que l'on appelle plus communément les charbons. Ces composants permettent le contact électrique nécessaire au fonctionnement du moteur et lubrifient simultanément les surfaces métalliques en contact. Le graphite est l'état le plus stable du carbone aux pressions et températures standard. C'est aussi, dans l'absolu, un état très stable, même à des températures élevées. Ainsi, on utilise le graphite pour réaliser les disques de freins des Airbus, des TGV, la plupart des tuyères des missiles et celles de la fusée Ariane. Son excellente résistance aux chocs thermiques en fait un matériau de choix pour servir de moule dans le domaine de la verrerie, pour souder des rails par aluminothermie, ou encore pour découper des métaux par électroérosion.

LE CARBONE DIAMANT

Le mot **diamant** vient, quant à lui du mot grec *adamastos*, invincible.



Son incroyable dureté avait déjà été remarquée par les Hindous, au III^e siècle avant J.-C. Néanmoins, il a fallu attendre le XVI^e siècle, pour qu'Antoine Laurent de Lavoisier découvre que le diamant n'était autre que du carbone !

Où en trouve-t-on ?

Actuellement, les principales **mines de diamant** sont situées en Sibérie,



au Botswana, aux Indes, au Brésil, au Zaïre et en Afrique du Sud. On en trouve également en Guyane. Une des mines les plus productives du monde est celle à ciel ouvert de *Jwaneng* (au Botswana). On trouve dans le sous-sol de cette ville environ 1,24 carats de diamant par tonne de minerai. Son exploitation se fait dans des mines souterraines ou à ciel ouvert, mais aussi dans le lit des fleuves, notamment en Namibie. Par ailleurs, on commence à retraiter les anciens rejets car l'amélioration des techniques a permis d'y trouver jusqu'à 0,1 carat de diamant par tonne !

Le plus gros diamant du monde est sans conteste le *Cullinan*, découvert en Afrique du sud (à Pretoria) en 1905. Il pesait 3 106 carats, soit 621,2 g. Malheureusement, il fut offert au roi Édouard VII d'Angleterre, puis fractionné en plus



de 100 morceaux. Le plus gros de ces fragments (qui pèse tout de même 530 carats) reste le plus grand diamant blanc taillé au monde. Il brille depuis 1910 sur le **sceptre à la croix** des Joyaux de la Couronne britannique.

Propriétés

Le diamant fait partie des matériaux les plus durs que l'on puisse trouver, avec une dureté de 10 sur l'échelle de Mohr. Cette échelle, étalonnée de 1 à 10, permet de mesurer la dureté d'un matériau en le comparant à d'autres. Ce n'est ni une échelle linéaire, ni une échelle logarithmique. Sa dureté à l'échelle macroscopique peut s'expliquer par sa structure à l'état microscopique. En effet, dans la structure du diamant, chaque atome est au centre d'un tétraèdre régulier : il est donc entouré de 4 autres atomes de carbone auxquels il est relié, formant ainsi un réseau cristallin très stable. Cet arrangement résiste à la plupart des sollicitations extérieures (l'énergie de liaison entre les atomes de carbone est de 360 kJ/mol) et fait

du diamant l'un des matériaux les plus durs.

Le diamant est en outre un excellent isolant. En effet, dans sa configuration à l'état microscopique, chaque atome de carbone partage les 4 électrons situés sur sa couche de valence (couche électronique externe d'un atome) avec les 4 atomes de carbone les plus proches. Ainsi, tous les électrons sont utilisés pour former des liaisons entre atomes : il ne reste donc plus d'électrons de conduction et, de fait, le diamant ne peut pas être conducteur d'électricité.

À quoi servent les diamants ?

Les diamants font immédiatement penser aux bijoutiers et autres joailliers, qui utilisent cette pierre pour **orner certaines de leurs créations**. Mais plus de la



moitié des diamants produits dans le monde sont utilisés dans l'industrie ! En effet, le diamant est employé comme matériau constitutif des abrasifs ou autres outils de coupe, dans l'industrie nucléaire, au cœur des réacteurs, ou encore dans les trépan utilisés dans l'industrie pétrolière pour forer le sol et le sous-sol.

La fabrication de diamants artificiels

Le principe est assez simple, mais la réalité est toute différente : n'importe qui ne peut pas fabriquer un diamant dans sa cuisine ! En fait, tout s'explique quand on lit le diagramme des phases du carbone, un graphique représentant les domaines de l'état physique (les phases) d'un système (ici, le carbone

pur) en fonction de variables externes (ici, la pression et la température). Le diagramme des phases permet de connaître l'état stable dans lequel se trouve la matière, à une certaine température T et une pression P . Sur ce diagramme, on peut lire qu'à pression et température standard (1013,25 hPa, soit 1 atm et 25 °C, soit 298 K), l'état stable du carbone est le graphite. Il est donc normal que l'on trouve dans la nature beaucoup plus de carbone graphite que de carbone diamant.

Pourquoi les diamants existent-ils alors ? Vous l'aurez compris, les diamants, aussi paradoxal que cela puisse paraître, ne sont pas stables aux pressions et températures courantes ! En fait, on dit du carbone diamant qu'il est dans un état métastable : il est dans un état stable, mais ce n'est pas l'état le plus stable. Ainsi le diamant peut facilement se retransformer en graphite. Avec de l'agitation thermique (tout simplement en chauffant le diamant, à plusieurs milliers de degrés), il est possible d'observer cette transformation du diamant en graphite. Pour fabriquer donc artificiellement du diamant, il suffit d'élever la température et la pression jusqu'à atteindre un point du diagramme des phases situé dans la zone du diamant stable... en tout cas en théorie ! En pratique, les industriels mélangent du graphite et un solvant (un métal comme le nickel), et chauffent ce mélange entre 1667 °C et 1728 °C, le tout sous une pression de 54 000 bars (approximativement 54 000 fois la pression atmosphérique).

Le mélange fondu contient alors du carbone qui cristallise sous forme de diamant. Néanmoins, les diamants industriels ont quelques défauts : ils sont souvent de couleur jaune ou verte et présentent généralement moins de 1 carat et ne sont donc pas utilisables en joaillerie. En revanche,

Un élément précieux

16 kg

Quantité de carbone que renferme le corps d'un homme de 70 kg.

250 000 carats

Quantité de diamants utilisés pour raboter sur 120 km, la surface d'une autoroute en Floride en 1992.

500 000 000

Nombre de carats de diamants artificiels produits chaque année dans le monde.

19

Nombre de pays producteurs de diamants.

24

Nombre de faces du triaèdre, l'une des formes cristallines du diamant.

435 carats



Taille du diamant « Zale Light of Peace » offert par l'entreprise américaine Zale corporation (1970) dans le but de promouvoir la paix.

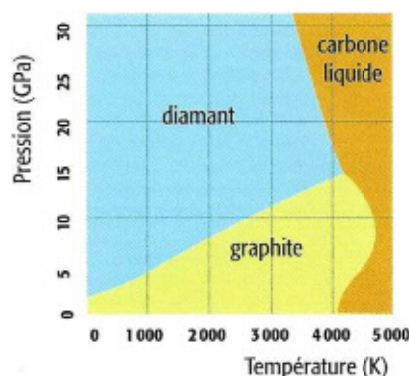
150 km

Profondeur à laquelle se forment les diamants à l'intérieur de la Terre.

Le « Cullinan », découvert à Pretoria
3 106 carats

(aujourd'hui fractionné en plus de 100 morceaux)

Le diagramme des phases du carbone



ils sont très adaptés au monde de l'industrie car ils ont un meilleur pouvoir de coupe et une durée d'utilisation plus longue. Ces diamants couvrent 90 % des besoins industriels en diamants.

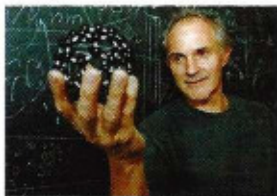
LE CARBONE LIQUIDE

Lorsque les conditions de pression et de température deviennent extrêmes, le carbone passe en phase liquide.

LES FULLERÈNES

Les fullerènes sont des molécules étranges, composées exclusivement d'atomes de carbone, et pouvant prendre la forme d'une sphère, d'un ellipsoïde, d'un tube (le fullerène prend alors le nom de nanotube) ou d'un anneau.

Le premier fullerène a été découvert en 1985 aux États-Unis, par trois chercheurs (Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley) qui ont obtenu le prix Nobel de chimie en 1996. Le fullerène le plus connu est sans conteste le C_{60} , aussi appelé footballène, en raison de sa forme, ou Buckminsterfullerène, en l'honneur de Richard Buckminster Fuller, ingénieur américain inventeur du **dôme géodésique** (il s'agit d'une



construction hémisphérique faite d'un réseau tridimensionnel de tiges d'acier). Ce fullerène est constitué de 12 pentagones, entourés et reliés entre eux de 20 hexagones. Le plus petit fullerène a été obtenu artificiellement. Il s'agit du C_{20} qui, au contraire, est très instable. Les propriétés des fullerènes sont encore assez méconnues.

LES NANOTUBES

Dix fois plus rigides que l'acier, six fois plus légers que lui, si minces qu'il en faudrait 50 000 pour obtenir une fibre de l'épaisseur d'un cheveu humain. Ils constituent véritablement la première invention des nanotechnologies.

Qu'est-ce qu'un nanotube ?

Les nanotubes de carbone sont des tubes jusqu'à mille fois plus longs que larges, fermés aux extrémités. À titre de comparaison, la tour Eiffel qui fait environ 125 m de large mesurerait 1 250 km de haut si elle avait le même rapport hauteur-largeur qu'un nanotube ! Ils ont été observés pour la première fois par un japonais, Sumio Iijima, en 1991.

Quelles applications ?

On est encore loin des premières applications industrielles de ce matériau si prometteur. Néanmoins, quelques propriétés intéressantes ont été mises en évidence. Tout d'abord, aussi incroyable que cela puisse paraître, les nanotubes seraient encore plus durs que le diamant ! Par ailleurs, du point de vue électrique, des chercheurs d'IBM auraient réussi à créer un transistor sur un nanotube, et ainsi réussi à obtenir un niveau de

miniaturisation jamais atteint. Ces nanotubes ont également des propriétés semi-conductrices, pouvant à la fois jouer le rôle de conducteurs ou isolants selon le champ électrique dans lequel ils se trouvent. Enfin, la structure creuse des nanotubes fait d'eux de petits récipients à l'échelle microscopique. Même s'ils restent assez mystérieux, les nanotubes n'ont pas fini de faire parler d'eux...

LA FIBRE DE CARBONE

La fibre de carbone constitue un matériau assez employé dans les technologies de l'aérospatiale et des véhicules de compétition (voiliers, automobiles, etc.), de par sa légèreté et sa très grande résistance. En fait, la fibre de carbone n'est autre qu'une forme de graphite, dans laquelle les couches sont longues et fines. Quand on parle de fibre de carbone au sens usuel, on parle en fait d'une couche de résine sur laquelle des fibres de carbone sont collées les unes aux autres.

LE CARBONE ET SES COMPOSÉS

Le carbone s'allie facilement avec d'autres atomes, pour former des molécules très variées. On présentera ci-après un panorama non-exhaustif de cette importante famille de composés dont on dénombre plus de 10 000 000 représentants !

LES COMPOSÉS ALIPHATIQUES

Sous ce nom on regroupe toutes les chaînes de carbone qui peuvent être modifiées par des groupes fonctionnels. Les groupes fonctionnels sont des groupes d'atomes qui viennent prendre place sur une chaîne existante. Ainsi, par exemple, l'éthane C_2H_6 devient l'éthanol CH_3CH_2OH , en remplaçant un atome d'hydrogène (H) par un groupe hydroxyle (OH). Il se transforme en acide acétique CH_3COOH (l'acide du vinaigre) en y substituant le groupe fonctionnel acide carboxylique (OOH).

Les hydrocarbures

Sous le terme d'hydrocarbure, la chimie rassemble tous les composés ne contenant que du carbone et de l'hydrogène. Au sens usuel, les hydrocarbures (gaz naturel et pétrole) sont en fait un vaste mélange de plusieurs dizaines de composés de la famille des hydrocarbures. Ainsi, le gaz naturel renferme entre autres plus de 70 % de méthane CH_4 , de l'éthane C_2H_6 , du propane C_3H_8 ainsi que du diazote N_2 et bien d'autres composés. En France, le gaz naturel est odorisé par du tétrahydrothiophène C_4H_8S quand il n'est pas assez odorant naturellement. Les principaux combustibles parmi les hydrocarbures sont les alcanes (méthane, éthane, propane, butane, etc.), chez lesquels deux atomes consécutifs de carbone sont réunis par une seule liaison.

Les composés oxygénés

Parmi les composés oxygénés, on trouve les alcools ainsi que les acides carboxyliques. Les alcools sont obtenus à partir d'alcane, en remplaçant un hydrogène par un groupe hydroxyle

OH. On obtient ainsi des composés qui trouvent de très nombreuses applications, des solvants jusqu'aux huiles essentielles pour la parfumerie. C'est l'éthanol, moins toxique que les autres alcools, qui rentre dans la composition des boissons alcoolisées. Les acides carboxyliques, quant à eux, sont obtenus en ajoutant le groupe OOH en fin de chaîne. Ils entrent en jeu en biologie, dans les acides gras et les acides aminés, mais aussi en chimie industrielle. L'acide sécrété par les fourmis, l'acide formique $COOH$ est un acide carboxylique.

LES COMPOSÉS AROMATIQUES

Les composés aromatiques contiennent tous un cycle d'atomes de carbone. Leur nom vient, bien évidemment, du fait qu'ils dégagent tous une odeur. On compte parmi ces composés le benzène et ses dérivés.

LE DIOXYDE DE CARBONE (CO_2)

La combustion du charbon et des hydrocarbures, la fermentation des



liquides et la respiration des humains et des animaux produisent du CO_2 . Ce composé est le résultat de la combinaison du carbone et de l'oxygène. Les plantes, quant à elles, assimilent le CO_2 et rejettent de l'oxygène.

LA DATATION AU CARBONE

La datation au carbone 14 permet de dater avec une précision relativement bonne des objets âgés d'au plus 50 000 ans.

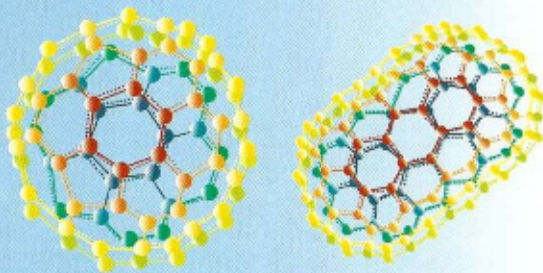
LES DIFFÉRENTS ISOTOPES DU CARBONE

Un atome de carbone se compose, dans sa forme la plus stable, de 6 électrons de 12 nucléons (à savoir 6 protons et 6 neutrons) dans son noyau : on le note ^{12}C . Il représente 98,89 % des atomes de carbone présents sur Terre. Il existe aussi le carbone 13, qui comprend cette fois 13 nucléons dans son noyau (toujours 6 protons, mais 7 neutrons) qui est également stable. Ce type de carbone compose 1,108 % des atomes de carbone. On dit que c'est un isotope du carbone 12, car il comprend le même nombre de protons, mais pas le même nombre de neutrons. Enfin, l'isotope le plus rare – puisqu'il compose 0,002 % des carbonés – est le carbone 14, noté ^{14}C : c'est lui que les scientifiques utilisent pour effectuer une datation au carbone 14.

D'OU VIENT LE CARBONE 14 ?

Les gaz de la haute atmosphère (essentiellement de l'azote (N) – composant près de 80 % de l'atmosphère –, qui a une masse de 14, c'est-à-dire qui comporte 14 nucléons) sont bombardés par les rayons cosmiques. Les atomes d'azote, en recevant de l'énergie par le biais des rayons cosmiques, donnent alors

Structure de 2 types de fullerènes



Le dôme géodésique

Le nanotube

des atomes de carbone 14. Ce dernier se combine avec le dioxygène de l'air (O_2), et donne tout bonnement du dioxyde de carbone (CO_2) radioactif qui se mélange alors au CO_2 issu des activités humaines ou naturelles : combustion d'hydrocarbures, respiration, volcanisme, etc.). Puis, par le biais de la photosynthèse, les végétaux absorbent ce $^{14}CO_2$. In fine, le carbone 14 se retrouve chez tous les êtres vivants qui absorbent directement ou indirectement ces végétaux.

PRINCIPES ET LIMITES DE LA DATATION

Tous les organismes vivants (végétaux ou animaux) contiennent donc du ^{14}C . Sa concentration commence à décroître avec la mort de l'organisme : à cause de son instabilité le ^{14}C se désintègre peu à peu. Les physiciens (depuis les recherches de **William Libby**,



initiées en 1948), ont mis au point une méthode pour estimer l'âge d'échantillons, en supposant que le rapport entre la quantité de carbone et celle de ^{14}C est restée constante dans l'atmosphère au cours des âges. Avant tout, seuls les échantillons issus d'êtres vivants peuvent être analysés car eux seuls ont pu, durant leur existence, assimiler du ^{14}C . Cela constitue une limite importante à la datation : il n'est pas possible de dater directement des minéraux (indirectement on peut tenter de dater les éventuels micro-organismes ou végétaux contenus dans ceux-ci). Les physiciens utilisent alors une propriété remarquable, découverte en 1951 par Libby lui-même : la période de demi-vie du ^{14}C est de 5 568 ans, plus ou moins 30 ans. Cela veut dire que si l'on attend 5 568 années, la moitié des atomes de ^{14}C auront disparu (ou plutôt ils se seront transformés en azote en émettant de la radioactivité) : on dit que le ^{14}C a une décroissance exponentielle.

Il suffit donc de compter le nombre de désintégrations que subit un échantillon par unité de temps, puis de lire le résultat sur les abaques (ou le calculer). La seconde limite vient du fait que si l'échantillon est ancien, il devient très difficile de déceler une désintégration, car celles-ci deviennent très rares. Ainsi, pour un échantillon de 1 g âgé de 50 000 ans, il faudra attendre 37 minutes pour compter une

désintégration ! Pour un échantillon similaire de 100 000 ans, il faudrait attendre 18 745 minutes, soit plus de 13 jours, pour observer la moindre désintégration. Ainsi, on considère souvent que cette méthode est utilisable pour des échantillons de moins de 50 000 ans.

QUELQUES MESURES

La datation au ^{14}C est surtout utilisée en archéologie, quand il n'est pas possible d'estimer l'âge par des repères purement historiques (pièces de monnaies datées, céramiques peintes, etc.). Une des premières datations au ^{14}C a été réalisée en 1950, sur des fragments de bois retrouvés sur le sol de la grotte de Lascaux. Les exemples sont nombreux en ce qui concerne la datation de lieux (pré)historiques : grotte de Cosquer, dans les calanques de Cassis, grotte de Chauvet, en Ardeche, site de Fontbrégoua, estimé à 6 000 ans avant J.-C. (obtenu



en datant le crâne d'un enfant, vraisemblablement mort par anthropophagie). Le **linceul de Turin** (censé être contemporain de la mort du Christ) s'est avéré, avec une datation au ^{14}C , être daté de la fin du Moyen Âge (vers l'an 1 300). C'est une véritable énigme à laquelle les scientifiques ont dû faire face, car plusieurs autres indices laissaient croire qu'il devait être daté de la mort du Christ. Ils en sont finalement arrivés à la conclusion que le linceul est bien contemporain de cet événement, mais qu'il a été rechargé en ^{14}C par un gigantesque incendie ayant eu lieu à Turin, en 1532, ou par la présence de micro-champignons dans le tissu, qui auraient continué à assimiler du ^{14}C bien après qu'il n'a été tissé. Au vu de cette anecdote, il apparaît que la méthode de datation ne se suffit pas à elle-même, et qu'il faut mettre cette technique en corrélation avec d'autres méthodes pour obtenir un résultat satisfaisant. Par ailleurs, le ^{14}C peut également être utilisé pour déterminer si un produit chimique (un colorant alimentaire, un parfum, un arôme, etc.) est d'origine naturelle ou synthétique. Lorsque le produit en question est d'origine naturelle, sa teneur en radiocarbone (l'autre nom du ^{14}C) sera la même que celle de l'atmosphère actuelle alors que s'il est obtenu par synthèse, sa teneur en ^{14}C sera faible, voire nulle.