

Presque tout sur l'oxygène

Jacques Deferne



Essai sur l'omniprésence de cet élément dans notre environnement, de son importance dans la structure des minéraux et dans les processus de la vie.

Avant propos

L'idée de ce texte m'est venue à l'esprit devant un étal rempli d'un amoncellement d'oranges serrées les unes contre les autres et qui cherchaient à remplir l'espace disponible le plus économiquement possible. Le rapprochement avec les assemblages compacts des structures minérales ma fait immédiatement établir la comparaison avec l'empilement des oranges sur leur étal.

Par ailleurs, en cherchant à établir la statistique de l'abondance des éléments chimiques de notre environnement, j'ai pris conscience de l'importance de cet élément chimique dans notre environnement puisqu'à lui seul, il représente 62 % de tous les atomes de la croûte terrestre, soit les trente premiers km qui sont sous nos pieds.

Ce sont les raisons qui m'ont décidé à lui consacrer cet petit ouvrage !

Jacques Deferne

Les atomes qui constituent l'écorce terrestre

Le noyau de notre planète semble constitué principalement de fer et de nickel. Mais dans la croûte continentale, soit dans les trente kilomètres environ qui se trouvent sous nos pieds, une dizaine d'éléments constituent à eux seuls 99.3 % de tout ceux que nous connaissons à travers le tableau périodique. de Monsieur Mendeleïev.

Les atomes sont très divers. On compte 92 sortes d'atomes différents dans la nature. On les appelle aussi **éléments chimiques**. Certains sont très abondants, d'autres sont rares voir même extrêmement rares. Ce sont eux qui, par leurs diverses combinaisons, constituent les minéraux des roches.

Dix éléments dominent en nombres d'atomes tous les autres. A eux seuls ils occupent 99.3 % de la croûte terrestre.

Abondance des éléments chimiques dans la croûte terrestre

Élément	Symb.	% en nb. d'atomes	Caractères géochimiques
Oxygène	O	60.2	Élément le plus abondant de la croûte terrestre. C'est un atome volumineux, porteur de deux charges négatives. Associé à de petits atomes chargés positivement, il constitue les "groupes anioniques" qui caractérisent la plupart des classes chimiques.
Silicium	Si	20.3	Deuxième en abondance, le silicium apparaît toujours associé à l'oxygène avec lequel il constitue le quartz ainsi que le groupe très important des silicates.
Aluminium	Al	6.2	L'aluminium est un composant important qui joue un rôle double : il apparaît dans les minéraux comme cation indépendant d'une part et peut aussi, d'autre part, remplacer partiellement le silicium dans certaines familles de silicates.
Hydrogène	H	2.9	C'est le plus léger de tous les atomes. On le trouve lié à l'oxygène sous la forme de groupes hydroxyles [OH] ou sous forme d'eau H ₂ O.
Sodium	Na	2.5	Abondant dans les feldspaths, il occupe une place importante dans les océans auxquels il confère leur salinité (NaCl).
Calcium	Ca	1.9	Présent dans presque toutes les classes minérales : fluorures, carbonates, sulfates, phosphates, silicates.
Fer	Fe	1.9	Omniprésent dans presque toutes les classes de minéraux.
Magnésium	Mg	1.8	Sous forme de carbonate et associé au calcium, il forme les roches dolomitiques. Mais c'est dans les silicates qu'il est abondant, comme son jumeau le fer, avec lequel il forme les silicates "ferro-magnésiens".
Potassium	K	1.3	Atome volumineux qu'on trouve surtout dans les feldspaths et les micas.
Titane	Ti	0.2	N'existe pratiquement que sous forme d'oxyde TiO ₂ .
Autres		0.7	Ne jouent aucun rôle majeur dans la croûte terrestre.

Le tiercé gagnant

Trois familles d'atomes constituent à elles seules 87 % de la croûte terrestre. C'est en premier lieu les soeurs Oxygène qui, en nombre d'atomes dominant tous les autres. Elles représentent 62% de la population ! Dans une représentation imagée, c'est une grosse dame (que les chimistes nomment anion) qui, avec ses deux bras, cherche à tous prix de s'unir avec des petit messieurs (les cations) pour former des minéraux.

En deuxième position vient le Silicium, un petit monsieur (un cation pour les chimistes) dont les quatre bras servent à établir des liaisons très fortes avec les dames Oxygène. I

En troisième place on trouve encore l'Aluminium dont les trois bras permettent aussi de solides liaisons avec Mmes Oxygène. Ces trois atomes se partagent à eux seuls 87 % de la croûte terrestre, toujours en nombres d'atomes.



Le tiercé gagnant

Ces trois familles constituent à elles seules 87% de tous les atomes de la croûte terrestre.

On trouve ensuite l'hydrogène, le sodium, le calcium, le fer, le magnésium, le potassium et le titane. Les 82 autres atomes sont donc très rares ou extrêmement rares. Le carbone qui nous paraît si abondant dans notre environnement ne représente que 0.001 % de la croûte terrestre. Le cuivre qui nous est si familier n'est présent qu'à raison de 0.0001% et le plomb que pour 0.000014 %.

Les atomes comme de petits personnages

Dans la fiction que j'avais utilisée dans « Le Monde étrange des Atomes », j'imaginai que les atomes étaient de petits personnages dont les bras symbolisaient les liaisons ioniques qui les reliaient les uns aux autres. Les dames, en rose, symbolisaient les anions et les messieurs, en bleu, symbolisaient les cations.

Ainsi Mlle Oxygène, un anion, était une grosse dame possédant deux bras alors que messieurs Silicium et Aluminium étaient de petits messieurs, des cations¹.

L'oxygène est partout

Nous pensons que l'oxygène est le gaz qui constitue une petite partie de l'atmosphère mais, en réalité, ces dames oxygène cherchent par tous les moyens à s'unir avec des messieurs (les cations) pour constituer, telles les briques du lego, les briques élémentaires qui serviront à construire la plupart des constituants chimiques. Ainsi, l'oxygène constitue les deux tiers des atomes du quartz (SiO_2), le tiers des atomes des océans et le 60 % des atomes des montagnes calcaires (CaCO_3).

¹ l'excès d'électrons chez les anions contribue à augmenter leur taille. C'est l'inverse qui confère aux cations leur petite taille.

Ces gros atomes d'oxygène remplissent tout l'espace. Comme les oranges sur un étal,, ils tendent à réaliser des assemblages qui soient le plus compact possible.

Les oranges s'arrangent en rangs serrés



Assemblage compact d'oranges :

On remarque que chaque orange est entourée de six interstices alors que chaque interstice n'est entouré que de trois oranges. Il y a donc deux fois plus d'interstices que d'oranges.

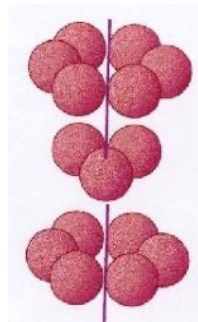
Pour des questions d'économie de place, les vendeurs d'oranges entassent leurs fruits en remplissant le mieux possible l'espace disponible. Ils les disposent en couches dans lesquelles chaque orange est entouré de six autres, comme dans les structures dites en "nids d'abeilles".

Il faut toutefois noter que chaque orange est entourée de six interstices alors que chaque interstice n'est entouré que de trois oranges.

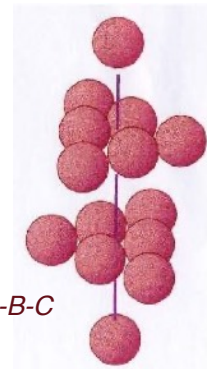
Puis les couches s'empilent les unes sur les autres de telle manière que chaque orange se place au-dessus de l'interstice situé entre trois oranges de la couche inférieure. La troisième couche peut être soit exactement à l'aplomb de la première, soit les oranges vont se positionner au-dessus des interstices non encore couverts par la première couche.

On peut les empiler de deux manières différentes

Comme il y a deux fois plus d'interstices que d'oranges, il existe deux possibilités d'empilement qui aboutissent chacune à un type d'assemblage compact particulier et qui occupe 74 % de l'espace total. L'assemblage A-B-A-B génère une symétrie cubique. L'empilement A-B-C-A-B-C génère une symétrie hexagonale. Ce sont ce que les minéralogistes nomment l'assemblage **hexagonal compact** et l'assemblage **cubique compact**.



Assemblage hexagonal compact, caractérisé par l'alternance A-B-A-B



Assemblage cubique compact, caractérisé par l'alternance A-B-C-A-B-C

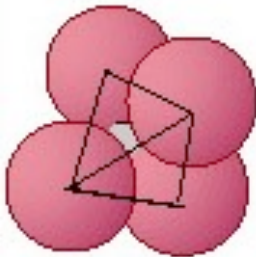
Les atomes d'oxygène, comme les oranges

Les atomes d'oxygène cherchent à s'assembler exactement comme nos oranges. Pour compenser leur excès des charges négatives qu'elles accumulent, ils invitent des petits atomes positifs à occuper les interstices qui existent entre eux.

Les interstices n'ont pas tous la même taille



Entre trois atomes d'oxygène on ne peut loger qu'un très petit atome, le carbone par exemple. Les 4 bras de Monsieur Carbone vont se lier aux 2 bras des demoiselles Oxygène pour former la brique CO_3 qui comporte alors 2 charges négatives résiduelles dues aux 2 bras encore libre des soeurs Oxygène. On parle de brique anionique parce que ce groupe se comporte comme un anion. Cela donne le groupe CO_3 qui est à la base de tous les carbonates. Les deux charges négatives résiduelles vont permettre, par exemple, de lier le groupe CO_3 avec un atome de calcium grâce aux deux charges positive de ce dernier. Cela donne CaCO_3 , la calcite. Dans cette même configuration on trouve le groupe NO_3 qui concerne la classe des nitrates.



Entre 4 atomes d'oxygène on peut placer un moins petit atome, le Silicium par exemple. Cela donne le groupe SiO_4 qui est à la base de tous les silicates. Sur le même modèle, avec Messieurs Soufre, Phosphore, Chrome ou Wolfram on trouve les groupes PO_4 , SO_4 , CrO_4 , WO_4 qui caractérisent les phosphates, les sulfates, les chromates, les wolframates et encore quelques autres.

En simplifiant

En simplifiant à l'extrême, on pourrait presque affirmer que la croûte terrestre et les minéraux qui la composent, n'est qu'un immense assemblage compact de gros atomes d'oxygène entre lesquels se réfugient, tant bien que mal, les petits atomes métalliques !



Apparition de l'oxygène dans l'atmosphère

L'oxygène n'a pas toujours été présent dans l'atmosphère. Au tout début l'histoire de la Terre, il n'y avait pas encore d'océans, et l'atmosphère de l'époque provenait du dégazage des laves rejetées par les nombreux volcans. Cette atmosphère était probablement composée d'azote (N_2), d'ammoniac (NH_3), de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et de vapeur d'eau. L'atmosphère ne contenait pas encore d'oxygène libre et un effet de serre important conférait à la surface de notre planète une température passablement plus élevée que celle d'aujourd'hui.

C'est dans cet environnement qu'apparaissent, il y a près de 3 milliards d'années, les premières bactéries, les **cyanobactéries**, des sortes d'algues bleues. On voit alors apparaître de curieuses constructions calcaires, les **stromatolithes**. Ce sont des constructions dues à l'activité de ces cyanobactéries. Ces algues ont commencé à produire déjà l'oxygène par le truchement de la photosynthèse naissante..



Stromatolithes actuels, (Baie Shark, Australie)

A ce titre les stromatolites ont contribué pour une très large part à l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène. Ils ont participé à l'édification de puissants massifs calcaires et ont ainsi participé à la fixation du CO_2 de l'atmosphère, diminuant ainsi l'effet de serre et abaissant la température de l'environnement.

L'atmosphère actuelle

Aujourd'hui, l'atmosphère est principalement composée de 78% d'azote, de 21% d'oxygène. Le 1% restant est principalement constitué d'argon, de CO_2 et de vapeur d'eau.

Mais l'oxygène produit par les cyanobactéries il y a plus de 3 milliards d'années n'a pas immédiatement colonisé l'atmosphère, mais a été tout d'abord monopolisé par l'oxydation du fer abondant dans les océans. Ce n'est qu'après la formation des dépôts de fer oxydés que l'oxygène a commencé à apparaître dans l'atmosphère.

Minerais de fer oxydés

Les gisements de fer dits **rubanés** constituent le 90% des minerais exploités dans le monde. Là encore c'est la combinaison du fer avec l'oxygène. Ces dépôts sont liés à une transformation majeure de la vie sur Terre² survenue il y a plus de 3'000 Ma³. Ce sont des lits alternés d'oxydes de fer et de lits quartziques. Ils proviennent de dépôts très anciens dont le âges sont compris entre 2'000 et 3'500 Ma. Leur origine est due à ce que les géologues appellent "la grande oxydation" liée à la libération de l'oxygène par les premières premières formes de vie, les bactéries anaérobies.

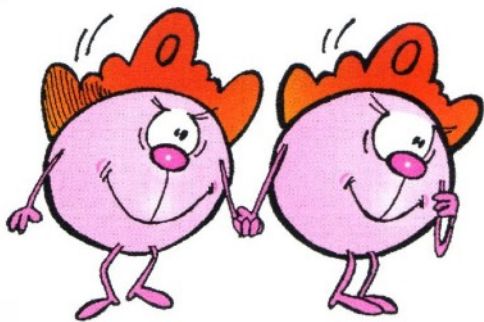


Bloc de fer rubané âgé de 2.1 milliards d'années. Amérique du Nord, (photo André Karwath).

Comportement communautaire des soeurs oxygène

Dans l'atmosphère les soeurs Oxygène se promènent toujours deux par deux, formant une molécule qu'on nomme dioxygène. C'est le dioxygène que nous inhalons.

Beaucoup plus rarement, elles se regroupent trois par trois, c'est l'ozone (O₃). L'ozone est présent dans l'atmosphère où il forme entre 13 et 40 km d'altitude qui intercepte une bonne partie des rayons ultraviolets du Soleil.



Deux par deux, c'est le dioxygène que nous respirons



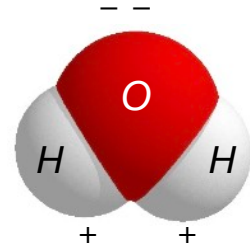
Trois par trois, c'est l'ozone qui nous protège des rayons U.V.

² Voir du même auteur: <https://kasuku.ch/la-grande-aventure-de-la-terre/>

³ Ma est l'abréviation de un million d'années.

Avec l'hydrogène c'est de l'eau

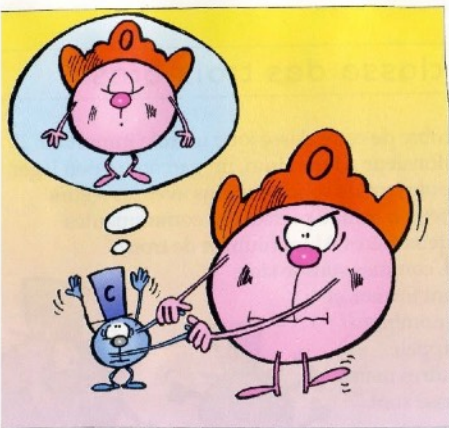
Avec deux atomes d'hydrogène, l'oxygène constitue une molécule d'eau. Les deux atomes d'hydrogène sont collés asymétriquement contre l'atome d'oxygène. Cette caractéristique fait que dans un champ magnétique oscillant extrêmement rapide les molécules d'eau se mettent à osciller et donc à s'échauffer. C'est ce qui se produit dans un four à micro-ondes.



Avec le carbone

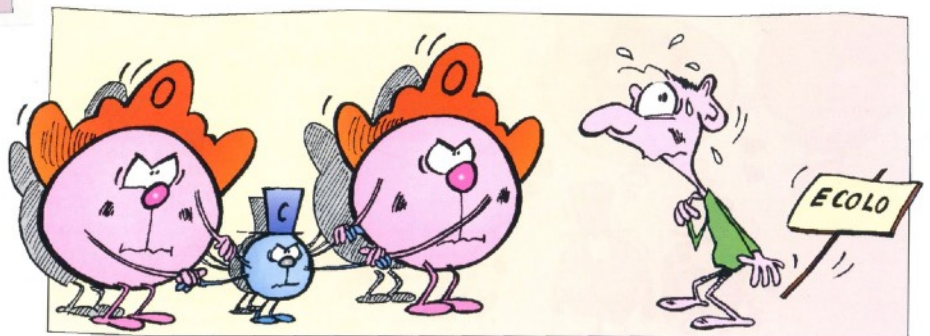
Au delà de sa grande affinité pour l'hydrogène, l'oxygène aime aussi beaucoup le carbone et forme le **dioxyde de carbone**, CO_2 , un gaz incolore, inodore et à saveur piquante.

La combustion incomplète du charbon aboutit aussi à la formation du **monoxyde de carbone**, CO , un gaz incolore, inodore, non irritant et peu soluble dans l'eau. Il est produit par une combustion incomplète dans les moteurs thermiques, les turbines des avions, les feux de forêts ou les chauffages domestiques mal réglés. Il est extrêmement toxique même à des concentrations très faibles. Il se fixe sur les globules rouges du sang, empêchant ces derniers de véhiculer correctement l'oxygène.



Le couple CO est très dangereux et peut vous asphyxier si vous ne vous méfiez pas. Il aspire toujours à séduire une seconde demoiselle Oxygène...

...pour former le trio CO_2 qui donne tant de soucis aux écologistes.



Avec beaucoup d'autres éléments

Une quarantaine d'éléments peuvent former avec l'oxygène $[O]^{-2}$ la classe des oxydes qui compose de très nombreux minéraux avec les éléments Be, Mg, Al, Si, Ti, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, Sn, Nb, Ta, Th et U.

Principaux minéraux constituant la classe des Oxydes

Cuprite, Cu_2O	Pyrolusite, MnO_2	Bixbyite, $(Mn,Fe)_2O_3$
Chalcotrichite, Cu_2O	Anatase, TiO_2	Perovskite, $CaTiO_3$
Glace, H_2O	Brookite, TiO_2	Spinelle, $MgAl_2O_4$
Périclase, MgO	Uraninite, UO_2	Magnétite, $FeFe_2O_4$
Zincite, ZnO	Thorianite, ThO_2	Franklinite, $(Fe,Zn,Mn)(Fe,Mn)_2O_4$
Ténorite, CuO	Corindon, Al_2O_3	Chromite, $FeCr_2O_4$
Quartz, SiO_2	Hématite, Fe_2O_3	Hausmannite, $MnMn_2O_4$
Cassitérite, SnO_2	Ilménite, $FeTiO_3$	
Rutile, TiO_2	Braunite, $(Mn,Si)_2O_2$	

Parfois, le groupe $[OH]$ se substitue à l'oxygène pour former la classe des hydroxyde. Ainsi $MgO \Rightarrow Mg(OH)_2$ la brucite et $Al_2O_3 \Rightarrow Al(OH)_3$ la gibbsite.

Les groupes anioniques

L'oxygène est souvent groupé avec les éléments C, N, B, S, Cr, W, Mo, P, As, Sb et V et former les principaux groupes anioniques qui composent les carbonates $[CO_3]^{2-}$, les nitrates $[NO_3]^{1-}$, les borates $(BO_3)^{3-}$, des sulfates $(SO_4)^{3-}$ les chromates $[CrO_4]^{2-}$, les wolframates $[WO_4]^{2-}$, les molybdates $[MoO_4]^{2-}$ et les phosphates $[PO_4]^{3-}$.

Il n'est pas question ici de décrire tous les minéraux de ces groupes et vous pouvez consulter mon autre ouvrage : « Le classification des minéraux ».

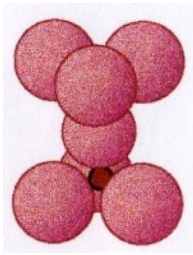
Le cas particulier des silicates

Les silicates sont les principaux constituants des roches éruptives et métamorphiques. A eux seuls ils constituent le 80% de la croûte terrestre. Si on ajoute encore le quartz, il faut porter ce chiffre à 92%.

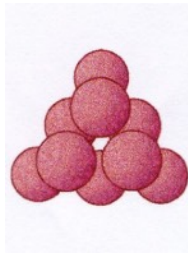
Le groupe anionique $[SiO_4]$ est constitué d'un petit atome de silicium entouré de quatre gros atomes d'oxygène qui occupent les sommets d'un tétraèdre imaginaire. On l'appelle habituellement le tétraèdre SiO_4 . Ce groupe est très difficile à dissocier. En outre, il possède la particularité de pouvoir constituer des sous-groupes, des **polymères** en mettant en commun avec leurs voisins certains de leurs atomes d'oxygène.

En d'autres termes, ils peuvent s'associer soit en groupes de 2 tétraèdres, soit en anneaux de 3, 4 ou 6 tétraèdres, soit encore en chaînes de longueur indéfinie, en couches et même en charpentes tridimensionnelles. La classification des silicates est donc basée sur le degré de polymérisation des tétraèdres.

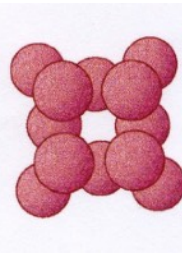
Les divers modes de polymérisation des tétraèdres SiO_4



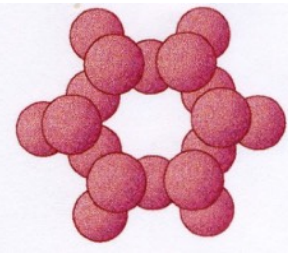
Si_2O_7
2 tétraèdres



Si_3O_9



Si_4O_{12}

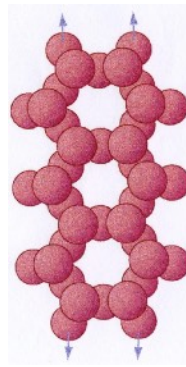


Si_6O_{18}

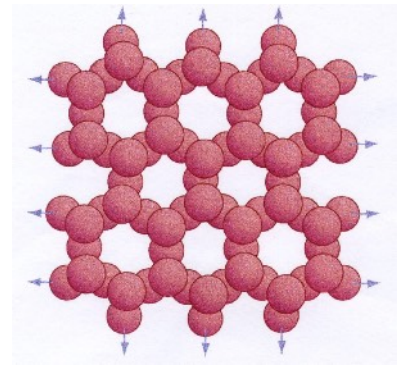
Anneaux de trois, quatre ou six tétraèdres



SiO_3
Chaîne simple



Si_4O_{11}
Chaîne double



$\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$ ou $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_{10}$
Tétraèdres polymérisés en couche

Avec deux tétraèdres, on trouve l'hémimorphite $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Avec trois tétraèdres, on trouve le bénitoïde $\text{BaTi}(\text{Si}_3\text{O}_9)$

Avec quatre tétraèdres, on trouve l'axinite $(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Al}_2(\text{BO}_3)(\text{Si}_4\text{O}_{12})(\text{OH})$

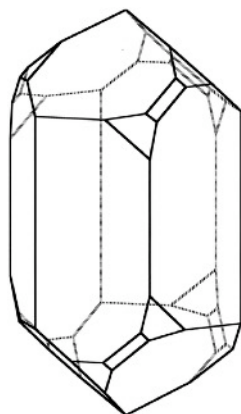
Avec six tétraèdres, on trouve le béryl $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$

Avec une chaîne simple, on trouve l'enstatite MgSiO_3

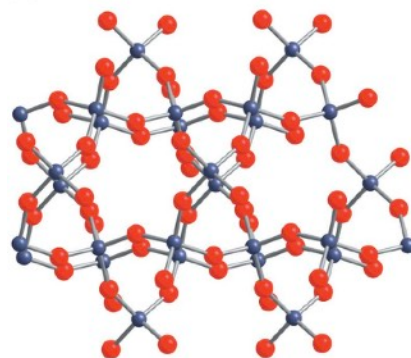
Avec une chaîne double, on trouve l'actinote $\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$

Le cas du quartz

Dans le cas du quartz, tous les atomes d'oxygène d'un tétraèdre SiO_4 sont partagés avec les atomes d'oxygène d'un tétraèdre voisin. La proportion d'oxygène vis-à-vis du silicium devient alors SiO_2 .



Cristal de quartz

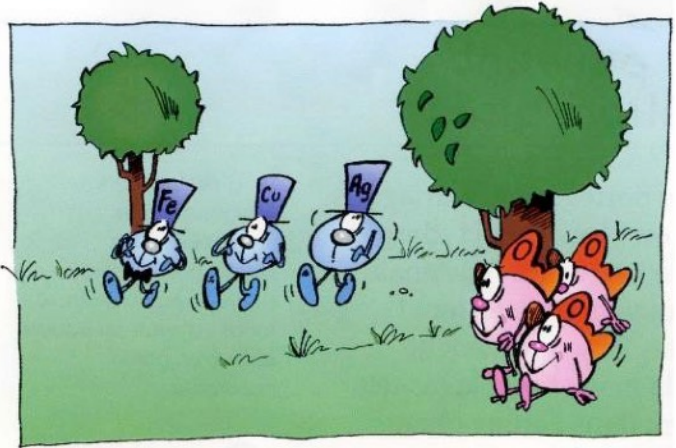


Structure du

Les soeurs oxygène n'aiment pas rester longtemps célibataires

Certains atomes se complaisent parfois dans l'état de célibat. C'est par exemple le cas de Messieurs Cuivre, Fer ou Argent qui peuvent se balader tranquillement les mains dans les poches. En réalité ce sont surtout les Terriens qui les forcent à rester célibataires pour les usages qu'ils en font.

Toutefois, les sœurs Oxygène veillent sournoisement et sont prêtes à oxyder l'argent, le cuivre et à rouiller le fer. C'est ce qu'on appelle **l'oxydation** !



Les sœurs Oxygène guettent sournoisement les messieurs encore célibataires

L'oxygène aide à la combustion

La production de chaleur, ce phénomène qui a pendant longtemps intrigué les physiciens, est la conséquence de l'oxydation plus ou moins rapide des composés chimiques avides d'oxygène, ce qui entraîne leur combustion.

La combustion constitue une réaction chimique hautement exothermique, c'est-à-dire qu'elle libère une quantité importante de chaleur.

Avec l'hydrogène: la réaction s'écrit $2H_2 + 2O_2 \rightarrow 2H_2O$
cette réaction dégage une énergie 39,4 kWh/kg

Avec le méthane, la réaction s'écrit : $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$
cette réaction dégage une énergie 11 kWh/kg

Avec le carbone, la réaction s'écrit : $C + O_2 \rightarrow CO_2$
cette réaction dégage énergie 8,9 kWh/kg

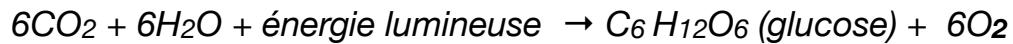
Avec l'essence, la réaction s'écrit : $C_7H_{16} + 11 O_2 \rightarrow 7 CO_2 + 8 H_2O$
cette réaction dégage une énergie de 13 kWh/kg

Rôle de l'oxygène dans la vie végétale

Les arbres respirent nuit et jour comme tout être vivant, en absorbant de l'oxygène et rejetant du CO_2 . Mais, durant la journée, par le biais de la photosynthèse, sous l'effet de l'énergie lumineuse du soleil, ils absorbent de grandes quantités de CO_2 . Le bilan est positif car la masse végétal rejette plus d'oxygène qu'elle n'en consomme.

C'est la photosynthèse qui est à la base de toute la vie végétale. Cette réaction est apparue il y a environ 3 milliards grâce aux cyanobactéries, sortes d'algues bleues qui ont commencé à produire de l'oxygène libre.

En simplifiant, sous l'influence de l'énergie solaire, le CO₂ et l'eau H₂O entraînent la formation de glucose, dont la végétation se nourrit, et libère de l'oxygène.



On estime qu'un arbre absorbe chaque année une trentaine de kg de CO₂. La totalité du monde végétal absorbe chaque années 62 giga-tonnes de CO₂.

La respiration animale

Les animaux ont besoin d'oxygène pour transformer en énergie les nutriments qu'ils extraient de leur nourriture. C'est ce qu'on appelle le **métabolisme**. Pour cela ils doivent respirer, inhaler de l'air qui passe par les bronchioles puis aboutit dans les alvéoles pulmonaires où l'oxygène est absorbé.

Un homme adulte inhale chaque jour 12'000 litres d'air dont 2500 litres d'oxygène. Il en restitue environ 500 litres. Mais c'est surtout là que l'oxyde de carbone, apparaît, un déchet du métabolisme, qui est rejeté.

Un homme adulte rejette ainsi environ 800 gr de CO₂ par jour. On estime que la respiration animale produit dans le monde environ 60 giga-tonnes de CO₂ par an.
