



*Presque tout sur le carbone*

*par*

*Jacques Deferne*

## *Avant propos*

*Le carbone est le sixième élément chimique du tableau périodique. Il possède donc 6 protons auxquels s'ajoutent habituellement 6 neutrons pour constituer l'isotope stable  $^{12}\text{C}$ . Bien que ne représentant que le carbone ne représente que 0.02% de la croûte terrestre, notre vie de tous les jours est fortement influencée par cet élément :*

- nous brûlons du charbon et des hydrocarbures pour nous déplacer, nous chauffer et faire fonctionner nos industries,*
- par le biais de notre respiration, nous rejetons chaque jour 900 g. de  $\text{CO}_2$ ,*
- les organismes vivants ne fonctionnent qu'à travers la chimie basée sur les dérivés du carbone,*
- la végétation consomme beaucoup de  $\text{CO}_2$  pour constituer le bois,*
- les organismes marins l'utilisent aussi pour constituer leur squelette calcaire,*
- les polémiques sur l'origine du réchauffement climatique mettent en cause le  $\text{CO}_2$  dont la teneur dans l'atmosphère induirait une augmentation de l'effet de serre,*
- accessoirement les dames aiment les diamants, une forme pure de carbone !*

*Ces considérations méritent donc que nous lui consacrons ce petit ouvrage pour mieux connaître le cycle du carbone dont nous sommes tributaires plus que de tout autre élément.*

*Le sujet est polémique sur certains aspects, aussi vais-je essayer de rester le plus possible objectif et me cantonner aux faits scientifiquement démontrés.*

*Bonne lecture !*

## *Le carbone dans la nature*

*La matière est constituée d'atomes qui s'associent pour former des composés chimiques. Il y a environ 90 sortes d'atomes dans la croûte terrestre. On les appelle éléments chimiques et ce sont eux qui constituent la matière qui nous entoure. Certains atomes sont très abondants, d'autres sont beaucoup plus rares.*

### *Abondance des principaux éléments de la croûte terrestre (en nombre d'atomes)*

<i>Elément</i>	<i>Symb.</i>	<i>%</i>	<i>Caractères géochimiques</i>
<i>Oxygène</i>	<i>O</i>	<i>60,2</i>	<i>Elément 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 de nombreuses classes chimiques.</i>
<i>Silicium</i>	<i>Si</i>	<i>20,3</i>	<i>Deuxième en abondance, le silicium apparaît toujours associé à l'oxygène avec lequel il constitue le quartz et participe à l'important groupe des silicates.</i>
<i>Aluminium</i>	<i>Al</i>	<i>6,2</i>	<i>L'aluminium est un élément 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 la structure de certains silicates.</i>
<i>Hydrogène</i>	<i>H</i>	<i>2,9</i>	<i>C'est le plus léger de tous les atomes. On le trouve lié à l'oxygène sous la forme de groupes hydroxyles [OH], sous forme d'eau H<sub>2</sub>O et sous forme de CH<sub>4</sub> comme brique élémentaire des hydrocarbures.</i>
<i>Sodium</i>	<i>Na</i>	<i>2,5</i>	<i>Abondant dans les feldspaths, il occupe une place importante dans les océans auxquels il confère leur salinité (NaCl).</i>
<i>Calcium</i>	<i>Ca</i>	<i>1,9</i>	<i>Présent dans presque toutes les classes minérales : fluorures, carbonates, sulfates, phosphates, silicates. Constituant majeur des calcaires et des feldspaths calco-alcalins.</i>
<i>Fer</i>	<i>Fe</i>	<i>1,9</i>	<i>Omniprésent dans presque toutes les classes de minéraux.</i>
<i>Magnesium</i>	<i>Mg</i>	<i>1,8</i>	<i>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".</i>
<i>Potassium</i>	<i>K</i>	<i>1,3</i>	<i>Atome volumineux qu'on trouve surtout dans les feldspaths et les micas.</i>
<i>Titane</i>	<i>Ti</i>	<i>0,2</i>	<i>N'existe pratiquement que sous forme d'oxyde.</i>
<i>Autres éléments</i>		<i>0,7</i>	<i>Ne jouent aucun rôle majeur dans la croûte terrestre.</i>

*On voit que dix éléments composent à eux seuls 99.3 % des atomes de la croûte terrestre. Tous les autres éléments se partagent le 0.7 % restant.*

Les membres de la famille Cuivre, qui nous paraissent être abondants par l'usage qu'en font les Terriens, n'existent en réalité qu'en très faible quantité : deux ou trois atomes sur 100.000 !

Les frères Carbone qui aussi nous semblent abondants par le rôle important qu'ils jouent dans le monde vivant ne représentent que 0.02 % de la population. Ne parlons même pas des aristocrates Or, Argent ou Platine, encore bien plus rares, qui ne constituent que moins de un cent millionième de la population !

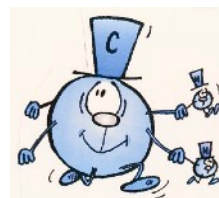
Comme les atomes ont des poids et des volumes très différents les uns des autres, les pourcentages de leur abondance changent suivant qu'on exprime les proportions relatives des éléments, en poids, en volume ou en nombre d'atomes.

Ainsi, si on considère le petit hydrogène qui est le plus léger de tous les éléments, on voit qu'il représente 2.8 % du nombre d'atomes qui constituent la croûte terrestre mais seulement 0.15 % en poids !

### La cas du carbone

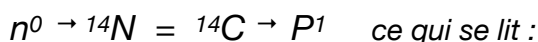
Sur du tableau périodique, appelé aussi tableau de Mendeleïev<sup>1</sup>, le carbone est le sixième élément dans la longue suite de ses congénères. On le désigne par l'abréviation <sup>12</sup>C. Il possède 6 protons et six neutrons et son poids atomique est 12.011. C'est l'isotope<sup>2</sup> le plus courant du carbone. On trouve aussi deux autres isotopes, <sup>13</sup>C et <sup>14</sup>C qui renferment respectivement 7 et 8 neutrons. Mais ils sont plutôt rares.

C  
Carbone  
12,011



<sup>12</sup> C	98,93%	stable avec 6 neutrons
<sup>13</sup> C	1,07%	stable avec 7 neutrons
<sup>14</sup> C	traces	instable avec période de 5'730 ans

On voit que le carbone 14 [<sup>14</sup>C] est très instable. Il aurait dû disparaître de la nature depuis longtemps en raison de sa très brève demi-vie (5'730 ans), mais sa disparition est compensée en permanence par la formation de cet isotope dans la haute atmosphère par transmutation de l'azote 14 [<sup>14</sup>N] sous l'action des rayons cosmiques. La réaction est :



un atome d'azote frappé par un neutron expulse un proton et se transmute en carbone 14.

<sup>1</sup> Dmitri Ivanovitch Mendeleïev, chimiste russe (1834-1907), inventeur de la classification périodique des éléments chimiques.

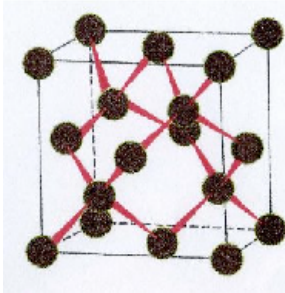
<sup>2</sup> Rappelons que le nombre de neutrons à l'intérieur du noyau d'un atome peu varier. Le carbone peut renfermer 6, 7 ou 8 neutrons. Ces atomes, légèrement différents par leur masse, sont des sortes de cousins d'une même famille. On les appelle des isotopes. Les propriétés chimiques sont semblables. Ce n'est que leur masse qui est un peu différente. Pour mesurer leurs proportions respectives, on utilise un spectrographe de masse.

## Le carbone peut cristalliser

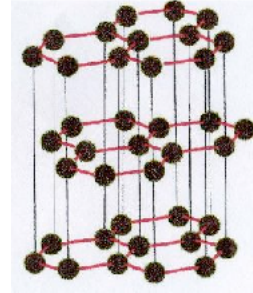
Dans le monde minéral, le carbone peut cristalliser sous 2 formes distinctes : le diamant ou le graphite, deux minéraux aux propriétés diamétralement opposées. L'arrangement des atomes au sein de la structure dépend des conditions de pression et de température dans lesquelles le minéral s'est formé. Le diamant a besoin d'une pression énorme pour cristalliser alors qu'à faible pression le carbone cristallise sous forme de graphite.

Propriétés physiques du diamant et du graphite

	Syst. cristallin	Transparence	Indice réfraction	Poids sp.	Dureté é
diamant	cubique	transparent	2.42	3.5	10
graphite	hexagonal	opaque	—	2.2	1



structure du diamant,



structure du graphite



Diamant et graphite : polymorphisme du carbone

La structure cubique du diamant est très compacte. La distance entre chaque atome n'est que de 1.544 Å. Cela donne à l'ensemble une très forte cohésion. La dureté du diamant est 10, c'est la dureté la plus élevée de tous les minéraux. Le diamant se consume intégralement en dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  sans laisser de cendre.

La structure du graphite est constituée d'un empilement de couches avec une structure hexagonale en "nids d'abeilles", séparées les unes des autres par une distance de 3.35 Å. Les liaisons entre les atomes de carbone dans les couches à structure hexagonale sont très fortes. Ce sont les fameuses feuilles de graphène !

La liaison entre 2 couches est très faible, régie par des forces dites "de van der Waals". Cela explique la très faible dureté du graphite. La mine des crayons, appelée autrefois "mine de plomb", est en fait du graphite.

## Où trouve-t-on le carbone ?

### Dans la lithosphère

Une partie du carbone est momentanément immobilisé dans la croûte terrestre (ou lithosphère) et son principal réservoir se trouve dans les roches carbonatées, les calcaires du Jura, par exemple. La composition chimique de la calcite, le principal composant des calcaires, est  $\text{CaCO}_3$ . Le carbone représente le 20 % des atomes qui des roches carbonatées, 13.5 % si on considère le poids. On estime que les roches calcaires réparties sur les continents renferment 30'000'000 gigatonnes<sup>3</sup> [Gt] de carbone. On trouve également le carbone sous forme de charbon et d'hydrocarbures. On les exploite abondamment pour l'énergie qu'ils produisent. On estime que les gisements de charbon et d'hydrocarbures renferment 7'000'000 Gt de carbone.



#### Le Creux-du-Van,

Un cirque de roches calcaires dans le massif du Jura.

Le calcaire renferme 12 % de carbone, en poids. C'est un des principaux réservoirs de carbone (30'000'000 Gt).



Exploitation d'une couche de charbon à ciel ouvert aux U.S.A.



Pompage du pétrole en Syrie

<sup>3</sup> une gigatonne [Gt] équivaut à un milliard de tonnes

## *Dans la biosphère*

*La biosphère concerne l'ensemble des manifestations de la vie, soit le règne végétal et le règne animal. Son existence est intimement liée à l'interaction qu'elle entretient avec la terre végétale, l'atmosphère et l'hydrosphère. Dans la biosphère, le carbone joue un rôle prépondérant car il est à la base de toutes les réactions de la chimie organique. En particulier, grâce à la photosynthèse, le CO<sub>2</sub> de l'air synthétise la cellulose (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>, le principal composant du bois. On estime que les forêts accumulent 2'000 Gt de carbone sous forme de bois.*



### *Forêt primaire en Indonésie*

*La végétation est un grand réservoir de carbone (env. 2'000 Gt).*

## *Dans les océans (l'hydrosphère)*

*L'océan absorbe le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère :*

- *par dissolution naturelle du CO<sub>2</sub> à la surface de l'eau ;*
- *par l'activité du **phytoplancton**<sup>4</sup> qui absorbe le CO<sub>2</sub> et rejette de l'oxygène par le biais de la photosynthèse ;*
- *par l'activité des microorganismes du zooplancton<sup>5</sup> qui fixent le carbone dans leur test calcaire. A la mort de ces organismes, les squelettes calcaires s'accumulent sur les fonds marin formant les boues calcaires qui, plus tard, par durcissement, constitueront les roches calcaires*

*La quantité de CO<sub>2</sub> renfermée dans les océans est estimée à 39'000 Gt.*

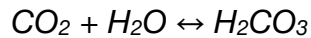
---

<sup>4</sup> *plancton végétal, organismes microscopiques qui peuplent la partie superficielle des océans.*

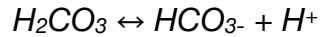
<sup>5</sup> *plancton animal, organismes microscopiques qui sécrètent des tests calcaires.*

## Absorption du CO<sub>2</sub> par l'eau de mer et formation du calcaire

En simplifiant on peut écrire que l'absorption du CO<sub>2</sub> par les océans contribue à former de l'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) selon le schéma suivant :



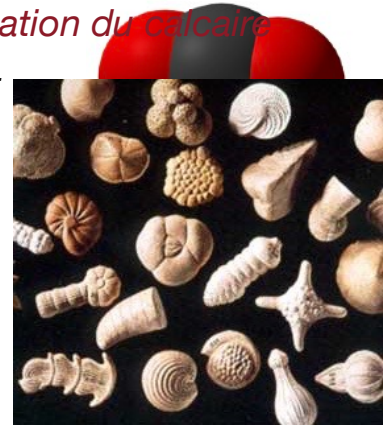
L'acide carbonique se dissout à son tour alors dans l'eau selon le schéma :



Puis, par combinaison avec les ions calcium contenu dans l'eau de mer, les foraminifères, ces microorganismes unicellulaires, sécrètent alors leur test calcaire selon le schéma :



On voit que cette réaction libère à son tour un petit excès de CO<sub>2</sub>.



Foraminifères

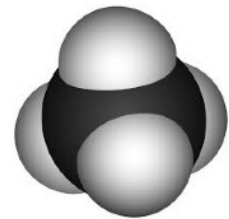
## Dans l'atmosphère

Le carbone se lie avec l'oxygène pour former la molécule CO<sub>2</sub>. C'est un gaz incolore, inodore à saveur piquante. On le connaît sous le nom de **gaz carbonique** ou **anhydrite carbonique**. Il représente environ 0.04% de l'atmosphère.

Plus rarement, le carbone peut se combiner aussi avec 4 atomes d'hydrogène pour former la molécule de **méthane**, CH<sub>4</sub>. Sa teneur dans l'atmosphère est d'environ 0.0018 %. Le méthane finit par s'oxyder et se transformer en CO<sub>2</sub> suivant le schéma :



La quantité de carbone présent dans l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub> est estimée à 750 Gt.



Méthane CH<sub>4</sub>

## Carbone immobilisé dans notre environnement

En englobant dans le terme environnement les roches sédimentaires qui renferment du carbone, on constate que la quantité totale de carbone ainsi immobilisée dans la lithosphère, l'hydrosphère, la biosphère et l'atmosphère est estimée à 79'750 Gt. (72'750 milliards de tonnes).

Le carbone momentanément stocké est donc :

- dans les roches calcaires, env. 30'000'000 Gt<sup>6</sup>,
- dans les gisements de charbon et d'hydrocarbures, env. 7'000'000 Gt.
- dans la biosphère, sous forme de bois, env. 2'000 Gt.

<sup>6</sup> Un gigatonne [Gt] correspond à un milliards de tonnes.



A l'état de CO<sub>2</sub> :

- dans l'atmosphère, env. 750 Gt (masse totale de l'atmosphère:  $5,13 \times 10^6$  Gt),
- dissous dans les eaux des océans, env. 39'000 Gt.

## Comportement du carbone

Contrairement aux minéraux qui sont des assemblages d'atomes liés entre eux principalement par des liaisons ioniques, le carbone est l'ami des liaisons covalences qui lui permettent de se lier facilement à l'oxygène et à l'hydrogène pour constituer deux gaz, le dioxyde de carbone et le méthane, qui jouent un rôle essentiel dans tous les processus liés à la vie.

A un second degré, le carbone et l'hydrogène sont les principaux constituants des hydrocarbures si bénéfiques pour l'usage que nous en faisons mais aussi maléfiques pour les conséquences sur l'environnement que leur usage abusif produit.

## Le méthane est un produit de l'industrie pétrolière

Le méthane CH<sub>4</sub> est un gaz incolore, inodore et facilement inflammable. Il est le produit de la décomposition de matières organiques à l'abri de l'air.

C'est le "gaz naturel" que nous utilisons à grande échelle pour notre chauffage domestique. C'est la portion la plus légère des hydrocarbures. La production annuelle de ce gaz par l'industrie pétrolière s'élève à 3'500 milliards de m<sup>3</sup>. A ce titre il fait partie de la grande famille des hydrocarbures.



On le trouve aussi partout où des déchets organiques se décomposent à l'abri de l'air. Les tourbières, les zones humides, les rizières et l'élevage du bétail sont de grands producteurs de méthane.

### Le grisou tant redouté des mineurs est du méthane

Lors de l'exploitation des mines de charbon, le méthane piégé dans le charbon se libère lentement dans les galeries. C'est le grisou des mineurs, composé à 90% de méthane. Lorsque la proportion de méthane dans l'air atteint des valeurs comprises entre 5 et 15%, cela donne un mélange détonnant qui explose à la moindre étincelle. C'est le coup de grisou tant redouté des mineurs.

On produit artificiellement le méthane plus ou moins pur dans des installations, des "digesteurs" en traitant les boues d'épuration et les déchets organiques : c'est le bio-gaz qui contribue partiellement à satisfaire nos besoins en énergie.

## La grande famille des hydrocarbures

### Le méthane, la brique élémentaire des hydrocarbures

Utilisé le plus souvent loin de son gisement, le méthane est liquéfié, refroidit à  $-160^{\circ}$  dans des usines de cryogénisation, puis transporté sous forme liquide dans des réservoirs à double paroi isolés comme des bouteilles thermos. Les méthaniers sont des navires spécialement équipés de tels réservoirs.



Un méthanier

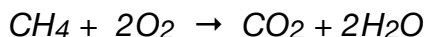
Mais le méthane est surtout la brique élémentaire qui, comme dans un jeu de lego, permet les très nombreux assemblages que sont les hydrocarbures. Par exemple le butane,  $C_4H_{10}$ , est constitué de 4 briques de méthane mises bout à bout.



La farandole de butane  $C_4H_{10}$  appartient à la grande société des hydrocarbures

### Fin de vie du méthane

Le méthane finit toujours par être transformé en  $CO_2$  par l'usage que nous en faisons en qualité de combustible selon le schéma suivant :

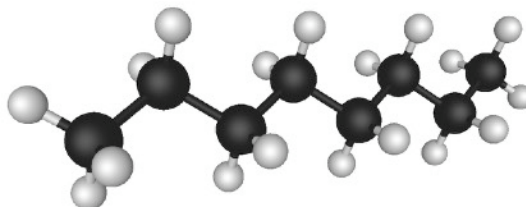


Dans la haute atmosphère, le méthane finit par s'oxyder et se transformer aussi en  $CO_2$  en une dizaine d'années.

## Le méthane, comme un jeu de lego

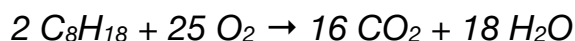
Comment nous l'avons écrit plus haut, le méthane constitue la brique élémentaire qui, comme dans un jeu de lego, permet les très nombreux assemblages que sont les hydrocarbures. Ils sont composés uniquement de carbone et d'hydrogène. Par exemple 2, 3, ou 4 briques élémentaires de  $\text{CH}_4$  mises bout à bout construisent les chaînes bien connues que sont l'éthane  $\text{C}_2\text{H}_6$ , le propane  $\text{C}_3\text{H}_8$  ou le butane  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ .

Octane,  $\text{C}_8\text{H}_{18}$

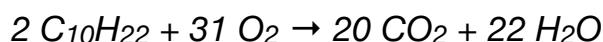


La viscosité et température d'ébullition de telles chaînes augmentent avec la longueur de la chaîne. On peut allonger encore leur longueur presque sans limite. Les chaînes très courtes sont à l'état gazeux (méthane, butane), puis en s'allongeant elles deviennent liquides (essences) et lorsqu'elles sont très longues les produits sont pâteux à solide, tels les goudrons.

Ainsi l'octane  $\text{C}_8\text{H}_{18}$ , bien connu des automobilistes, est une chaîne faite de 8 briques de notre lego méthane, c'est une forme d'essence qui explose dans les cylindres de nos chères automobiles selon la réaction :

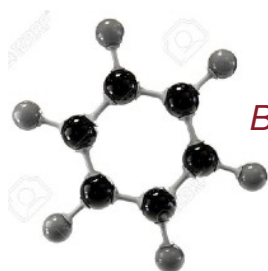


Le kérosène est un mélange d'hydrocarbures dont les formules sont comprises entre  $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$  et  $\text{C}_{14}\text{H}_{30}$ . La combustion du kérosène se fait selon la réaction :

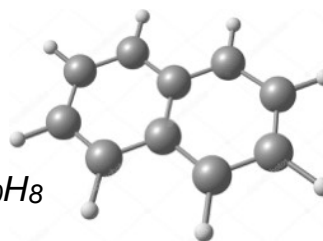


Cette réaction libère une énergie de 10'300 kcal par kilogramme de carburant.

Les briques  $\text{CH}_4$  présentent encore de nombreuses possibilités d'assemblage. Ainsi le benzène est constitué d'un anneau hexagonal, le naphthalène, mieux connue des mites sous le nom de naphaline, est constitué d'une sorte de chaîne double.



Benzène  $\text{C}_6\text{H}_6$



Naphtalène,  $\text{C}_{10}\text{H}_8$

## Origine des hydrocarbures

Le pétrole tire son origine d'un processus de décomposition très lent qui se développe au sein de sédiments marins ou lacustres. Les gisements que nous exploitons aujourd'hui se sont formés il y a de nombreux millions d'années. Au cours de la sédimentation, les débris organiques déposés sur les fonds des océans, des deltas ou des lacs sont lentement

décomposés par des bactéries. Ce processus aboutit à la formation d'une substance solide, le **kérogène**, un mélange complexe disséminé dans son environnement sédimentaire.

Puis, après un enfouissement de plus en plus profond provoqué par l'accumulation constante de nouvelles alluvions, l'élévation de température transforme lentement ce kérogène en produits pétroliers ne renfermant que du carbone et de l'hydrogène : ce sont les hydrocarbures. C'est la température qui conditionne alors le type de pétrole formé. En dessous de 120° le kérogène se transforme essentiellement en pétrole accompagné d'une faible quantité de gaz. La proportion de gaz augmente rapidement avec l'augmentation de température à laquelle la roche est soumise. Les sédiments dans lesquels le pétrole s'est formé est appelé **roche-mère**.

### **Le pétrole tend à s'échapper de la roche-mère**

Le pétrole est donc constitué d'un mélange complexe de divers hydrocarbures, formant un liquide plus ou moins visqueux mélangé à du gaz. Dans sa **roche-mère**, roche à dans laquelle il s'est formé, le pétrole, dont le poids spécifique est largement inférieur à la roche, a tendance à vouloir migrer vers le haut.

Si aucun obstacle ne l'arrête, il atteint la surface où il subit l'action conjointe de l'oxygène et de bactéries qui le transforment en un produit solide, le bitume qui va imprégner les sols en surface, en constituer, par exemple, les immenses gisements de sables bitumineux du Nord du Canada.



Sable bitumineux, Alberta, Canada

(source : Wikipédia)

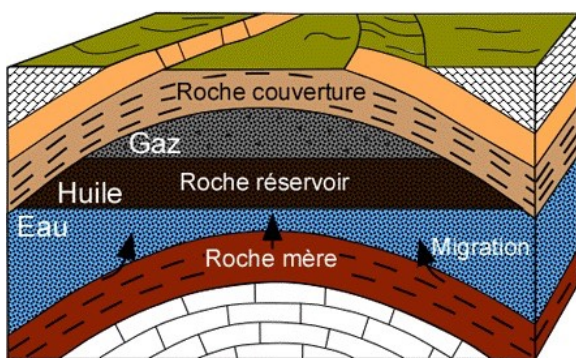
### **Prisonniers de la roche-mère : ce sont les "gaz de schiste".**

Dans la plupart des cas, les hydrocarbures restent prisonniers de leur roche-mère sous une forme plus ou moins évoluée selon la température qui dépend elle-même de la profondeur de leur enfouissement. A faible température ce sont des **schistes bitumineux**. Avec l'augmentation de la température on trouve du "**pétrole de schiste**" puis, pour une température encore plus élevée, on trouve alors le "**gaz de schiste**".

Les gisements des roches-mères sont considérables, mais les hydrocarbures y restent prisonniers d'un environnement imperméable. L'usage fait qu'on les appelle "gaz de schiste". Mais ce ne sont pas des schistes au sens pétrographique du terme. Ce sont en fait des roches sédimentaires poreuses mais rendues imperméables par leur teneur en argile.

Il faut des techniques d'exploitation très spéciales et coûteuses qui passent par la fracturation de ces roches par injection de vapeur d'eau et de solvants à haute pression. Avec l'augmentation du prix du pétrole l'exploitation de ce type de pétrole est en constante augmentation. Les milieux écologistes sont très sceptiques sur les conséquences désastreuses qu'engendreraient ces méthodes d'exploitation.

## Le pétrole peut migrer vers des roches-réservoirs



Structure anticlinale où les hydrocarbures se trouvent piégés sous une couverture imperméable. Ils se superposent selon leur densité.

Si les roches-mères sont plus ou moins perméables, le pétrole et le gaz peuvent s'échapper et s'infiltrer dans d'autres roches sédimentaires et tendre à gagner la surface. Heureusement il arrive souvent que leur ascension soit stoppée par des couches imperméables, des roches argileuses par exemple, et le pétrole se trouve piégé dans des roches poreuses et perméables. Ce sont les **roches-réservoirs** appelées parfois aussi **roches-magasins**. Les structures anticlinales sont particulièrement favorables à l'exploitation du pétrole. Ce sont ces gisements qui sont le plus abondamment exploités aujourd'hui.

## Production mondiale actuelle

La production annuelle de pétrole est considérable. Elle est d'environ 16 milliards de  $m^3$ . Exprimée en  $m^3$  par seconde, cette production est d'environ  $185 m^3/s$ . A titre de comparaison, le débit moyen du Rhône à Genève est de  $225 m^3/s$  et celui de l'Arve de  $78 m^3/s$ .

La production annuelle de gaz est de 3'500 milliards de  $m^3$ , ce qui représente  $110'000 m^3$  par seconde. La production de gaz de schiste est en constance augmentation. Elle atteint aujourd'hui plus de 500 milliards de  $m^3$  par an.

<i>Comparaison entre la production mondiale de pétrole et le débit de deux cours d'eau</i>	
<i>Production mondiale pétrole</i>	<i>185 <math>m^3/s</math></i>
<i>Débit de l'Arve</i>	<i>78 <math>m^3/s</math></i>
<i>Débit du Rhône</i>	<i>225 <math>m^3/s</math></i>

## Le charbon

Le charbon peut être considéré comme une roche sédimentaire carbonée issue, tout comme les hydrocarbures, de la dégradation de végétaux morts à l'abri de l'oxygène. La formation du charbon a débuté au Carbonifère avec l'apparition d'une végétation abondante de grands arbres. Les conditions étaient très favorables à sa formation. Deux facteurs ont favorisé cette formation :

- l'apparition d'arbres à écorces et le développement d'immenses forêts dans un climat chaud et humide,
- un niveau des mers peu élevé qui a permis l'extension de vastes marécages.



Reconstitution d'une forêts du Carbonifère (Alex Bernardini)

### Formation

Le charbon se forme en milieux marécageux, lacustres ou côtiers. Les arbres morts sont noyés, recouverts d'alluvions et cet enfouissement les met à l'abri de l'oxygène empêchant leur pourrissement.

L'enfouissement progressif de ces débris végétaux sous l'accumulation de sédiments nouveaux entraîne une élévation progressive de la température. Au fur et à mesure de cette élévation de température, la cellulose se transforme, en passant par les différents stades que sont la tourbe, le lignite, la houille pour aboutir finalement à l'anhracite. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de chacun de ces constituants :

	Teneur en carbone	Matière volatile	Teneur en cendres	Pouvoir calorifique (kJ/Kg)
Tourbe	< 50%		> 50%	12 500
Lignite	55 à 70%	50%	30 à 50%	< 25'000
Houille	70 à 93%	15 à 40 %	10 à 30%	29 000
Anhracite	93 à 97%	≤ 10 %	≤ 10	34 000

**La tourbe** est le premier stade de la transformation des débris végétaux. Elle se forme en quelques milliers d'années dans un milieu gorgé d'eau, les tourbières. En fonction de l'avancement de la décomposition et des conditions de l'environnement on trouve :

- la **tourbe blonde**, peu décomposée, issue de l'accumulation de mousses qui sert, mélangé à du terreau, de substrat fertile pour l'horticulture,
- la **tourbe brune**, mieux décomposée est également un excellent substrat pour l'horticulture,
- la **tourbe noire** est la plus évoluée. Elle est riche en matière organique et minérale. En plus de ses qualités pour l'horticulture, ses propriétés lui confèrent une application dans le traitement de l'eau.

La tourbe est un combustible très médiocre. Elle a été largement utilisée comme combustible en Irlande surtout où on la trouve en abondance. Elle est tout d'abord séchée et comprimée en briquettes. Sa combustion est médiocre et dégage beaucoup de poussière.



*Exploitation de tourbe en Irlande*



*Briquettes séchées de tourbe*

**Le lignite** est un charbon qui est le stade intermédiaire entre la tourbe et la houille. Son pouvoir calorifique n'est pas très élevé et il est souvent riche en sulfures. On le considère plutôt comme un charbon "sale" à cause des produits volatils que sa combustion émet, en particulier les dioxydes de soufre et les oxydes d'azote. On l'utilise surtout dans les centrales électriques thermiques, en particulier en Allemagne qui possède d'immenses réserves de lignite.

**La houille** est le plus commun des charbons. Ce terme désigne généralement toutes les qualités de charbon allant du lignite jusqu'à l'anhracite, la variété la plus riche en carbone. Parfois on subdivise la houille en charbon sub-bitumineux et bitumineux selon sa teneur en produits volatils. Les principaux produits volatils sont l'hydrogène, le méthane et le monoxyde de carbone. Ces produits constituaient ce qu'on nommait autrefois le gaz de ville.

**L'anhracite** est le stade le plus évolué de la carbonisation des dépôts de charbon. Elle a la teneur en carbone élevée et un fort pouvoir calorifique. On ne la trouve que dans les dépôts datant de l'ère primaire (Carbonifère et Permien).

## De la houille au coke

Le coke est un combustible artificiel au pouvoir calorifique très élevé qui est utilisé dans les hauts fourneaux pour réduire le minerai de fer en fonte. C'est un produit obtenu par chauffage de la houille à haute température (jusqu'à 1'100°) et à l'abri de l'air. Ce procédé, appelé aussi pyrolyse, a été mis au point au début du XIXe siècle pour remplacer le charbon de bois qui était alors utilisé dans les hauts fourneaux. Les usines qui produisent le coke sont appelées cokeries. Tous les charbons ne sont pas cokéfiabiles. Ce sont surtout la houille et une partie du lignite qui peuvent être transformés en coke.

La transformation de la houille en coke libère des produits secondaires volatiles. Ainsi, un millions de tonnes de charbon traitées dans une cokerie libèrent ;

- 50'000 tonnes de goudron
- 15'000 tonnes de benzol<sup>7</sup>
- 500 millions de m<sup>3</sup> de méthane, d'hydrogène et de monoxyde de carbone autrefois récupérés en qualité de "gaz de ville".

## Le gaz de ville

Par distillation à sec, ou pyrolyse, le dégazage de la houille produit le gaz de ville qu'on a tout d'abord utilisé pour éclairer les villes avec des becs de gaz, puis distribué ensuite dans les immeubles pour le chauffage et le fonctionnement des cuisinières à gaz. C'est un mélange d'hydrogène, de méthane et de monoxyde de carbone. Le gaz de ville a progressivement disparu puis remplacé par le gaz naturel.

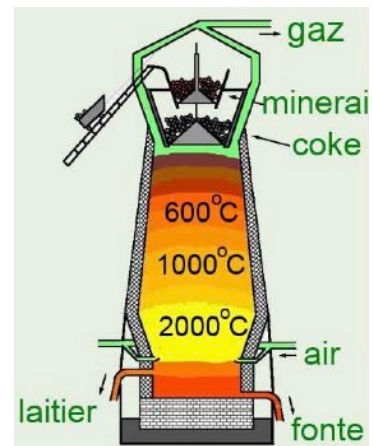


Schéma de fonctionnement d'un haut fourneau.



Usine à gaz de Vernier et ses gazomètres.  
Elle a fonctionné de 1914 jusqu'à 1967.

<sup>7</sup> mélange de solvants divers, benzène, toluène xylène.



## Usage du charbon

La plus grande part du charbon est utilisée pour la production d'électricité. Certaines grandes centrales thermiques alimentées au charbon en consomment plusieurs centaines de kg chaque seconde ! L'usage du charbon dans les hauts fourneaux pour la production de l'acier en fait le deuxième consommateur.

<i>Principaux utilisateurs du charbon</i>			
<i>Production électrique</i>	<i>68%</i>	<i>Industries diverses</i>	<i>8%</i>
<i>Sidérurgie</i>	<i>7%</i>	<i>Autres usages</i>	<i>13%</i>
<i>Cimenteries</i>	<i>4%</i>		

## Production mondiale de charbon

La production de charbon en 2017 a atteint 3'500'000'000 de tonnes (3.5 milliards de tonnes) Les réserves estimées sont d'environ 900 milliards de tonnes.

<i>Part des principaux pays producteurs de charbon</i>					
<i>Chine</i>	<i>45,7%</i>	<i>Australie</i>	<i>6,6%</i>	<i>Afrique du Sud</i>	<i>3,4%</i>
<i>Inde</i>	<i>9,3%</i>	<i>Indonésie</i>	<i>5,8%</i>	<i>Allemagne</i>	<i>2,4%</i>
<i>Etats-Unis</i>	<i>8,9%</i>	<i>Russie</i>	<i>5,3</i>	<i>Pologne</i>	<i>1,8%</i>



*Mine de charbon de Cerrejón en Colombie, une des plus grandes mines de charbon à ciel ouvert du monde. Sa production annuelle est d'environ 30 millions de tonnes. Les réserves sont estimées à 3 milliards de tonnes.*

## Ce dioxyde de carbone qui nous préoccupe tant !

Vers 1610, le médecin flamand Jean-Baptiste van Helmont (1579-1644) réalise une expérience au cours de laquelle, après avoir brûlé 62 livres de charbon, il ne subsistait guère plus qu'une ou deux livres de cendres. Il constate que les 60 livres disparues ne sont plus que "esprit". Il écrit alors :

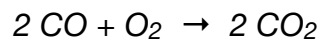
*"Cet esprit inconnu jusqu'ici qui ne peut être contenu dans des vaisseaux, ni être réduit en un corps visible, je l'appelle d'un nom nouveau, gaz. Il le baptise alors ce gaz "gaz sylvestre".*

Sans le savoir vraiment, il venait de découvrir le CO<sub>2</sub> et inventé un mot nouveau : le gaz !

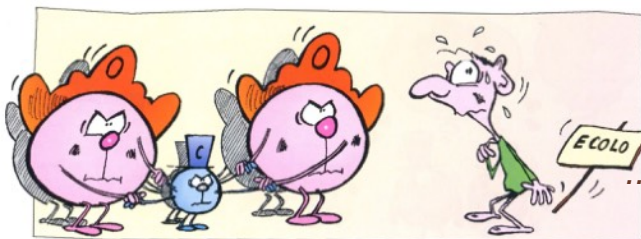
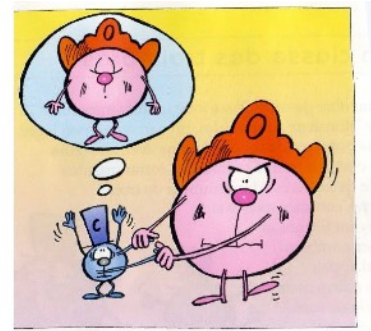
### CO et CO<sub>2</sub>

Au delà de sa grande affinité pour l'hydrogène, le carbone aime donc aussi beaucoup l'oxygène pour former le **dioxyde de carbone**, CO<sub>2</sub>, un gaz incolore, inodore et à saveur piquante.

Mais 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. Il brûle en présence d'oxygène pour donner du CO<sub>2</sub> selon le schéma :



*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<sub>2</sub> qui donne tant de soucis aux écologistes.*

Heureusement aujourd'hui le gaz domestique ne renferme plus de CO. Il est constitué en grande partie de méthane.

Autrefois, le gaz de ville était produit par distillation de la houille dans de grandes "usines à gaz". On obtenait un mélange gazeux comprenant de l'hydrogène, du méthane et du monoxyde de carbone. Ce gaz a tout d'abord été utilisé pour assurer l'éclairage public

puis distribué dans les habitations pour alimenter les cuisinières à gaz. Il a été remplacé aujourd'hui par le gaz naturel constitué principalement de méthane  $\text{CH}_4$ .

## Le dioxyde de carbone $\text{CO}_2$

Le fameux  $\text{CO}_2$ , qui nous préoccupe tant, est un gaz incolore, inodore et à saveur piquante. Cette saveur piquante est ressentie lorsque vous buvez une boisson gazéifiée car le gaz utilisé est justement du  $\text{CO}_2$ . Sa densité est une fois et demie plus élevée que celle de l'air. Il aura donc tendance à s'accumuler dans les parties basses des locaux. Sans être toxique, le  $\text{CO}_2$  a un effet narcotique lorsque sa teneur dans l'air dépasse 5%. Il peut entraîner une perte de connaissance et même conduire à la mort si la concentration est encore plus élevée.



Bonbonne de  $\text{CO}_2$  liquide

Gazeux à pression ordinaire, il se transforme en liquide à  $-56,6^\circ$  puis en glace à  $-78,5^\circ$ . On peut conserver du  $\text{CO}_2$  liquide comprimé dans des bonbonnes métallique à une pression de 57 bars pour une température de  $20^\circ$ .

## Le $\text{CO}_2$ ne tient pas en place

Le  $\text{CO}_2$  est l'élément fondamental du cycle du carbone. En permanence le  $\text{CO}_2$  est échangé entre l'atmosphère, la biosphère et les océans. Il intervient à toutes les phases du développement des végétaux et du développement de la vie. Les végétaux l'absorbent, les océans en sont friands, les volcans en rejettent, la respiration animale en restitue. Ainsi un être humain rejette en moyenne 900 g. de  $\text{CO}_2$  par jour.

## Usage du $\text{CO}_2$

Le dioxyde de carbone émis dans l'atmosphère par les industries pétrochimiques ou chimiques peut-être capturé puis purifié. Il a de multiples usages dans de nombreux secteurs. Les principaux usages sont :

### Sous forme gazeuse :

- composant pétillant des boissons gazeuses,
- adjonction de  $\text{CO}_2$  dans les serres pour une meilleure croissance des plantes,
- en emballages à atmosphère contrôlée pour éviter l'oxydation par l'oxygène,
- pour contrôler la teneur en calcaire de l'eau potable,
- agent propulseur de la distribution de bière dans les pubs,
- agent propulseur de certains sprays,
- agent caloporteur dans certains types de réacteurs nucléaires.

### Sous forme liquide :

- agent réfrigérant dans l'industrie électronique,
- extincteurs produisant la "neige carbonique"

### Sous forme solide :

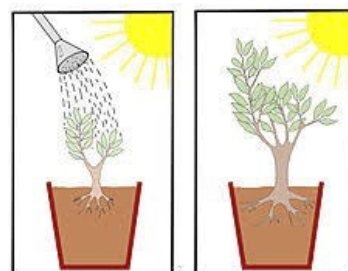
- c'est la glace carbonique produite industriellement pour de nombreux usages, en particulier pour le refroidissement et la surgélation rapide des aliments et pour maintenir la chaîne du froid lors de pannes d'électricité.



Johann Jakob Schwappe (1740-1821), un joaillier installé à Genève invente un procédé qui lui permet de dissoudre du  $\text{CO}_2$  dans de l'eau pour produire de l'eau gazeuse. En 1783, il dépose un brevet qui décrit son invention le "Schwappe's Soda Water". En 1790, il s'associe au pharmacien Henri-Albert Gosse et à Nicolas Paul, un ingénieur en pompes, pour produire de l'eau minérale gazeuse à Genève. A la suite de diverses péripéties commerciales, Schwappe s'installe à Londres où il fait fortune dans la production d'eau minérale. Après avoir vendu sa société, Jakob Schwappe rentre à Genève où il meurt en 1821. La marque Schweppes est toujours bien vivante aujourd'hui !

### Une autre expérience de Jean-Baptiste van Helmont

Il avait planté un jeune saule dans une caisse de bois contenant une quantité de terre bien déterminée. Après arrosage, durant cinq ans, avec de l'eau de pluie filtrée sur tamis, il observa que le poids de l'arbre avait augmenté de 76 kg, tandis que celui de la terre n'avait diminué que de 57 g. La terre n'ayant accusé aucune variation sensible de poids, il se demanda d'où provenait la substance qui s'était changée en bois et en racines. Il pensait que c'était l'eau. Il s'est trompé car on sait aujourd'hui que cet arbuste avait puisé le carbone nécessaire à sa croissance dans le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère !



### Extincteur à $\text{CO}_2$

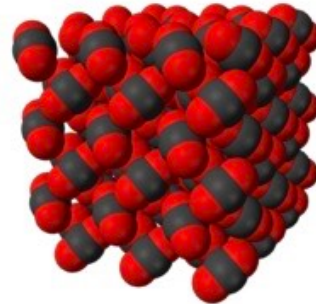
Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) contenu dans l'extincteur est comprimé et forme un mélange  $\text{CO}_2$  liquide surmonté de  $\text{CO}_2$  gazeux. Lors de son utilisation, la brusque diminution de pression éjecte le  $\text{CO}_2$  sous forme de neige carbonique à  $-78^\circ$ . Cela refroidit la partie qui brûle et étouffe les flammes par manque d'oxygène. Utilisé pour les feux d'origine électrique et les liquides inflammables.

## La glace carbonique

La glace carbonique est la forme solide de  $\text{CO}_2$  stable en dessous de  $-78,5^\circ$  Celsius. On l'appelle parfois glace sèche car elle **sublime**, c'est-à-dire qu'elle passe directement de l'état solide à l'état gazeux. Elle est utilisée comme réfrigérant dans de nombreux domaines. La bombe glacée que vous servez comme dessert vous a été livrée dans un emballage garni de glace carbonique. Plongée dans de l'eau, elle dégage un épais brouillard souvent utilisé dans divers spectacles.



Structure de la  
glace carbonique



Glace carbonique  
(photo canstock)

## Où se concentre donc le $\text{CO}_2$ ?

### Dans l'atmosphère

Les principaux constituants de l'atmosphère sont l'azote et l'oxygène. La masse totale de l'atmosphère est de 5'000'000 Gt. La teneur en  $\text{CO}_2$  est actuellement de 401 ppm<sup>8</sup> ou, autrement dit, 0.041 %. La quantité de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère équivaut à 750 Gt de carbone.

Principaux constituants de l'atmosphère	
Azote, $\text{N}_2$	78%
Oxygène, $\text{O}_2$	21%
Argon, Ar	1%
Dioxyde de carbone, $\text{CO}_2$	0,04%

### Dans la biosphère

On estime que la biosphère renferme 2'000 Gt de carbone immobilisé dans la végétation. La vie produit et absorbe du carbone sous forme de  $\text{CO}_2$ . Ainsi la respiration animale exhale 60 Gt de carbone qui va alimenter l'atmosphère en  $\text{CO}_2$ . Mais, dans l'autre sens, pour alimenter la croissance des végétaux, la photosynthèse prélève du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère équivalent à 62 Gt de carbone.

<sup>8</sup> ppm signifie partie par million

## Dans l'hydrosphère (les océans)

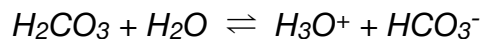
Les océans constituent un énorme réservoir de carbone. Ils renferment environ 40'000 Gt de carbone, sous forme d'acide carbonique  $H_2CO_3$ , d'ions bicarbonates  $HCO_3^-$  et de  $CO_2$ .

L'eau a la propriété de pouvoir dissoudre une certaine quantité de dioxyde de carbone. La solubilité du  $CO_2$  dépend de la température de l'eau comme le montre le tableau ci-dessous.

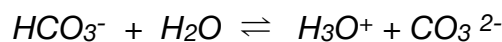
On constate que les océans très froids absorbent de grandes quantités de  $CO_2$ . Mais les courants sous marins entraînent ces eaux froides vers des zones plus chaudes. En se réchauffant, la solubilité du  $CO_2$  diminue et on assiste à une émission d'une certaine quantité de  $CO_2$  vers l'atmosphère. Il y a donc un échange permanent de  $CO_2$  entre l'atmosphère et l'hydrosphère : les mers froides en absorbent, les mers chaudes en restituent une partie. Le  $CO_2$  absorbé par les océans réagit avec l'eau pour former l'acide carbonique selon le schéma :



Une partie de l'acide carbonique se dissocie en ion hydronium et en ion bicarbonate :



L'ion bicarbonate peut se transformer à son tour en ion carbonate :



Le carbone présent dans l'eau de mer est principalement sous forme d'acide carbonique  $H_2CO_3$  (90%), l'ion bicarbonate  $HCO_3^-$  ne représente que 9% et le  $CO_2$  seulement 1%).

## La vie marine aime le $CO_2$

Le plancton désigne les myriades d'organismes vivants qui errent au gré des courants marins. Le phytoplancton, quasiment invisible à nos yeux, est constitué d'une multitude d'organismes végétaux microscopiques qui vivent dans les océans. La journée, ils vivent près de la surface, profitant de la lumière et de la photosynthèse. Ils absorbent du  $CO_2$  et rejettent de l'oxygène. C'est véritablement le poumon de la planète. Le phytoplancton consomme une grande partie du  $CO_2$  dissout dans les océans et produit d'énormes quantités d'oxygène.

*Le zooplancton est un plancton animal. La nuit, il remonte vers la surface pour se nourrir de phytoplancton. La journée, il redescend vers les profondeurs pour échapper à ses prédateurs.*

*La plupart des organismes planctoniques sécrètent un exosquelette calcaire à partir du calcium provenant de l'altération des roches et du CO<sub>2</sub> présent dans l'eau selon la réaction :*



*Tous les coquillages participent de la même manière au piégeage du CO<sub>2</sub> par le biais de l'élaboration de leur coquille calcaire. A la mort de ces organismes, leurs squelettes s'accumulent sur les fonds marins, participant à la formation des boues calcaires qui, si elles subissent la diagenèse<sup>9</sup>, se transformeront plus tard en calcaire. Ce processus participe d'une manière importante au piégeage du CO<sub>2</sub>.*

*Plus rarement, certains organismes sécrètent un squelette siliceux, telles les diatomées.*

*La vie marine est à l'origine de la vie, elle constitue un puits important de carbone, elle produit l'oxygène que nous respirons et la masse des déchets qu'elle produit et qui s'accumulent sur les fonds marin contribueront à produire du pétrole pour un avenir lointain !*

---

<sup>9</sup> *la diagenèse est le processus géologique par lequel des sédiments meubles subissent l'endurcissement qui les transformeront en roche solide.*

## A propos du climat

Le climat est l'équilibre atmosphérique qui règne en moyenne dans une région donnée. On le ressent par ses variations saisonnières de température, par ses épisodes pluvieux et par les vents qui balaient par moment ladite région.

Il nous semble parfois ressentir des «changements de climat » lorsque nous imaginons que les hivers sont moins froids qu'autrefois ou que certains étés sont particulièrement pluvieux. En réalité, pour définir le climat d'une région, il faut prendre en compte la moyenne des observations faites sur plusieurs dizaines d'années.

Mais ce qui est certain, c'est que les climats qui règnent dans les diverses régions de notre Planète, résultent d'un équilibre extrêmement précaire entre les divers acteurs qui les régissent. Ces acteurs sont principalement la situation géographique, l'ensoleillement, les vents, les courants marin et la subtile composition chimique de l'atmosphère qui conditionne l'effet de serre.

Les climats ont maintes fois changé au cours des millions d'années qui ont rythmé l'évolution de la Terre. Le niveau des mers a varié de plusieurs dizaines de mètres, les températures ont chuté ou, au contraire, augmenté. Des glaciers ont périodiquement envahi tout le Nord de l'Europe puis se sont retirés.

Mais l'Homme n'était pas là pour en rendre compte et, aujourd'hui, nous nous inquiétons, à juste titre, des petites variations climatiques qui semblent nous attendre et qui risquent peut-être de perturber notre environnement artificiellement aménagé par notre technologie.

### Le dioxyde de carbone et l'effet de serre

L'effet de serre est un acteur important du climat. De même qu'à l'intérieur d'une serre la température est maintenue à une température supérieure à celle du jardin qui l'entoure, divers constituants de la haute atmosphère constituent un voile protecteur qui empêche une partie du rayonnement infrarouge émis par notre planète de s'échapper vers l'espace. Ces constituants sont **les gaz dits à effet de serre**. Ce sont essentiellement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone, le méthane et le protoxyde d'azote. L'effet de serre est donc un phénomène naturel qui permet de retenir une partie de la chaleur du soleil dans notre atmosphère.



### Mécanisme de l'effet de serre

Le rayonnement infrarouge émis par la Terre est partiellement absorbé en altitude par les gaz à effet de serre. Ces derniers se réchauffent et renvoient à leur tour un rayonnement infrarouge vers la Terre. C'est l'effet de serre qui permet de maintenir à la



surface de notre planète une température moyenne agréable de 15°. Sans cet effet de serre, la température tomberait très vite à -18°.

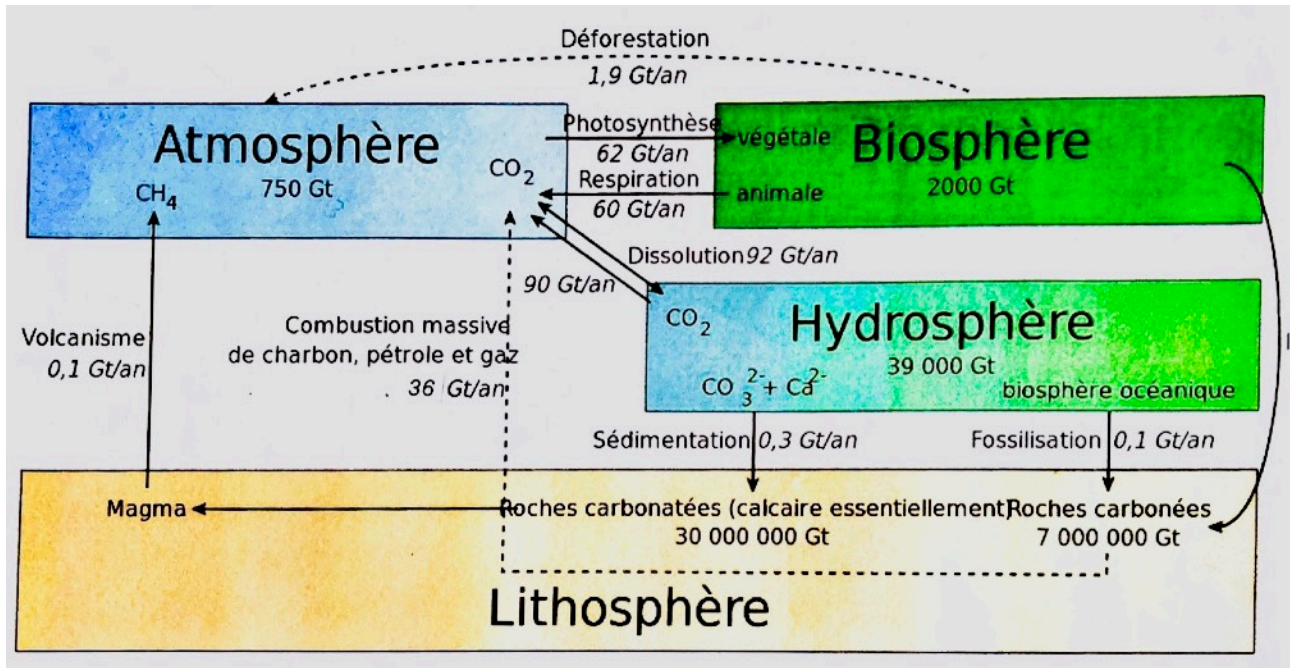
*Principaux gaz à effet de serre et importance de leur contribution*

<i>vapeur d'eau, H<sub>2</sub>O</i>	<i>60%</i>	<i>ozone, O<sub>3</sub></i>	<i>8%</i>
<i>dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub></i>	<i>26%</i>	<i>méthane, CH<sub>4</sub> protoxyde d'azote</i>	<i>6%</i>

C'est probablement des variations de l'effet de serre couplés avec des modifications de la circulation des courants marins qui ont conditionné les changements climatiques importants dans l'histoire géologique ancienne de notre planète. Il ne faut pas négliger non plus les variations des paramètres des mouvements de notre planète sur son orbite qui engendrent des modifications de l'ensoleillement. Ce sont aussi des manifestations volcaniques de grande envergure qui, dans un passé lointain, ont rejeté d'énormes quantités de gaz dans l'atmosphère, modifiant l'effet de serre et entraîné des modifications du climat de la planète.

## Le cycle du carbone

Le tableau ci-dessous résume bien les tribulation du CO<sub>2</sub> entre l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Les chiffres indiqués sont exprimées en équivalent carbone. La plupart des auteurs sont en accord avec ces chiffres qui sont, bien entendu, des ordres de grandeur.



### Comment lire ce tableau

Ce tableau montre les quatre grandes entités qui hébergent du CO<sub>2</sub> et qui échangent ce gaz entre elles. Les quantités immobilisées sont exprimées en giga-tonnes [Gt] soit 1 milliard de tonnes. Les échanges de CO<sub>2</sub> sont exprimés en Gt/an d'équivalent carbone.

On remarque que la respiration animale émet 2 fois plus de carbone que la combustion du charbon et des hydrocarbures. On constate aussi que les échanges entre l'hydrosphère et l'atmosphère sont très importants en regard de émissions des combustibles fossiles.

Toutefois, l'échange de carbone entre la lithosphère et l'atmosphère qui, avant les activités humaines, était très faible, apporte artificiellement aujourd'hui un supplément annuel d'une trentaine de CO<sub>2</sub> à l'atmosphère.

## A propos du climat

Depuis plus de 3 milliards d'années, il apparaît que la température de notre planète de s'est jamais éloignée de plus de quelques degrés de la température moyenne de 15°. Cette stabilité est remarquable en comparaison de ce qui se passe sur d'autres planètes. Cette stabilité est due à l'abondance de l'eau sur notre Terre.

Toutefois, une variabilité du climat est normale et dépend des fluctuations des courants océaniques, de la variation lente des paramètres astronomiques, des variations dans l'activité solaire, d'éruptions volcaniques majeures, de légères modifications de l'albédo<sup>10</sup> et de l'effet de serre.

## Ce que l'on constate

Nous avons découvert que, dans le dernier million d'années d'existence de notre planète, il y a eu alternance de périodes glaciaires interrompues par de courtes périodes de réchauffement.

Au cours de la période historique on a enregistré, entre environ 950 et 1350, ce qu'on a appelé **l'optimum climatique médiéval**, une période chaude qui a permis aux Vikings de coloniser le Groenland. La culture de la vigne s'est même étendue à tout le Nord de l'Europe, jusqu'en Ecosse.

Puis succède à ce réchauffement un brusque refroidissement entre environ 1400 et 1850. On l'a appelé **le petit âge glaciaire**. Les glaciers se développent et les langues glaciaires se sont avancées loin dans les vallées.

Dès le milieu du XIXème siècle, les températures remontent lentement. Ce réchauffement est un fait bien réel et on peut le qualifier de **réchauffement climatique**.

Depuis plus de 3 milliards d'années, il apparaît que la température de notre planète de s'est jamais éloignée de plus de quelques degrés de la température moyenne de 15°.

### Importance du retrait du glacier du Rhône entre 1855 et 2009



Glacier du Rhône en 1855

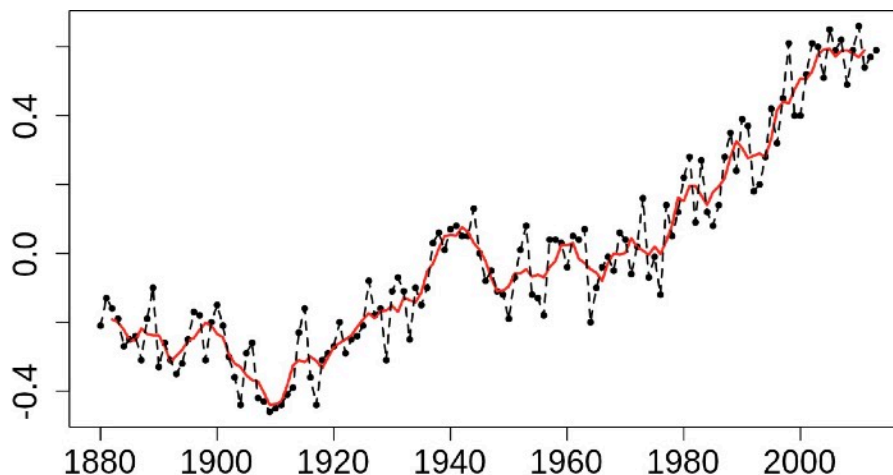


Glacier du Rhône en 2009 (photo Dumoulin)

<sup>10</sup> l'albedo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, la neige par exemple.

## Les causes possibles

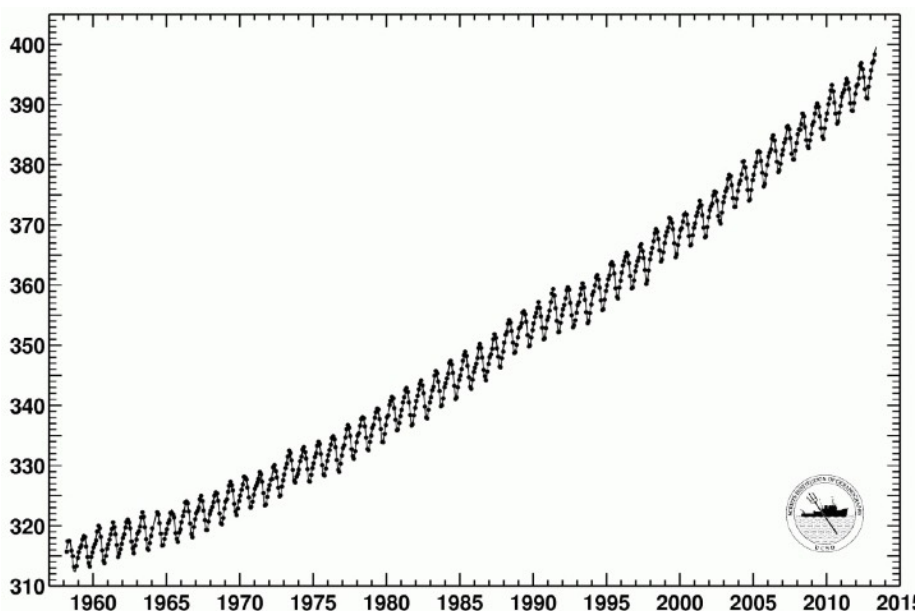
En observant les courbes ci-dessous, une première constatation s'impose : durant tout le XXème siècle la température moyenne augmente.



Variation de la température mondiale entre 1880 et 2015 (source : Nasa)

..... température enregistrée ——— moyenne lissée sur cinq ans

Sur le premier graphique, on voit que la température aurait diminué de  $0,2^{\circ}$  entre 1880 et 1910 puis amorcé une lente remontée avec un petit pic de température vers 1940, puis ensuite, après une petite descente vers 1950, on assiste à une lente remontée jusqu'en 1998. La dernière quinzaine d'années, soit à partir de 1998, on voit une stabilisation de cette courbe. J'ai utilisé le conditionnel au début de ce paragraphe car les méthodes de mesures se sont affinées au cours des dernières années et leurs conditions d'enregistrement ne sont plus tout à fait les mêmes.

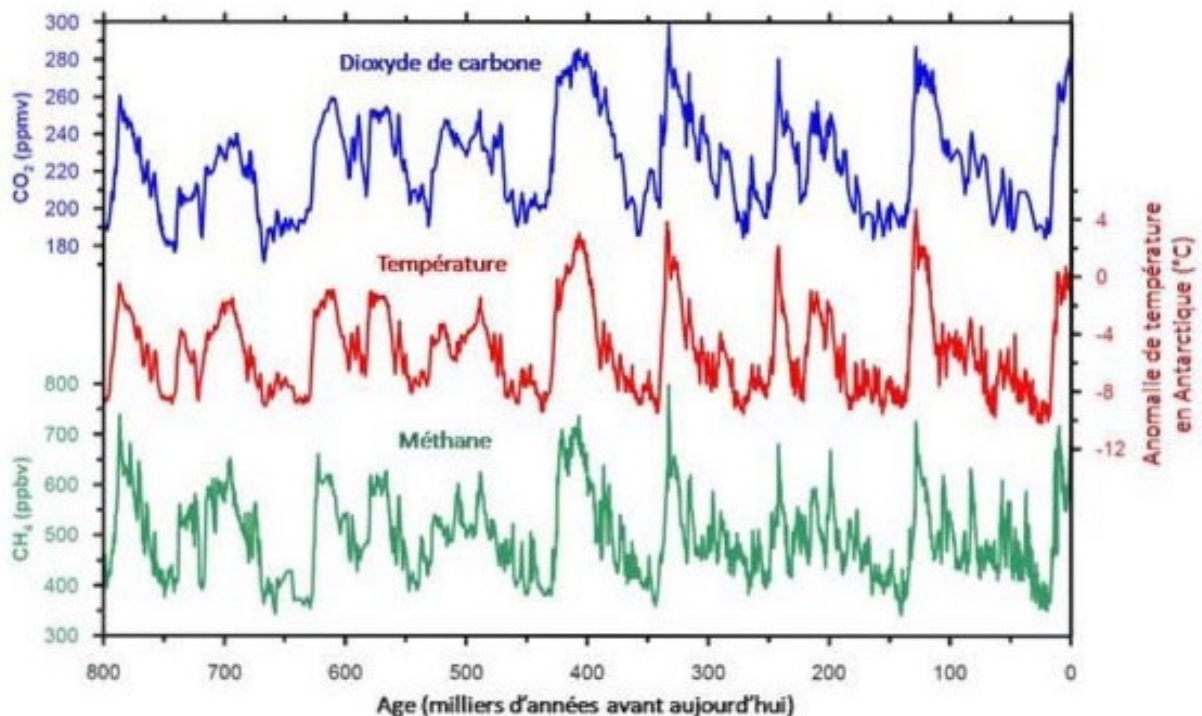


Teneur en  $CO_2$  de l'atmosphère (en ppm) enregistrée  
à l'observatoire de Mona Loa, Hawaï.

Quant au  $\text{CO}_2$ , on constate une constante augmentation de sa teneur<sup>11</sup> dans l'atmosphère. Il est alors tentant de lier la teneur en  $\text{CO}_2$  avec l'augmentation de la température. C'est ce que pense la plupart des mouvements écologiques.

### Que disent les carottes de glace ?

Le forage le plus profond réalisé en Antarctique a atteint 3'270m. On a atteint une glace qui s'est formée il y a 800'000 ans. L'étude de la composition de l'atmosphère piégée dans la glace ainsi que l'étude du rapport isotopique  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  qui renseigne sur la température qui régnait au moment de la chute de neige, montrent que les périodes interglaciaires, c'est à dire des périodes de réchauffement, correspondent avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CO}_2$  et celle du méthane. On observe une alternance de périodes glaciaires et de périodes interglaciaire au cours desquelles la température remonte



On ne peut évidemment pas attribuer ces augmentations de  $\text{CO}_2$  à une activité anthropique quelconque. On voit que la teneur en  $\text{CO}_2$  oscille environ entre 200 et 300 ppm. Aujourd'hui, on se rapproche de 400 p.p.m. ce qui pourrait laisser penser que la teneur actuelle en  $\text{CO}_2$  est particulièrement élevée et que c'est l'activité humaine qui pourrait en être la cause.

Mon avis personnel est qu'il ne faudrait pas négliger les autres paramètres qui ont une influence sur les variations climatiques et ne pas impliquer uniquement le  $\text{CO}_2$ .

<sup>11</sup> L'aspect "en dents de scie" de la courbe provient du fait que les enregistrements sont effectués en mai et en novembre. La différence d'environ 5 ppm provient de l'activité naturelle annuelle des forêts.

## Conclusion provisoire et personnelle

### *L'Homme est une espèce invasive*

*Homo sapiens est une espèce invasive qui prend une part importante dans les modifications de son environnement. Les grands mammifères qui existaient encore à l'arrivée de l'Homme ont disparu. L'explosion démographique incontrôlée provoquée par le développement de l'hygiène, l'invention de la vaccination et les progrès de la médecine a engendré un changement radical du comportement humain.*

*Loin du clan primitif de nos ancêtres lointains, nous nous regroupons aujourd'hui dans d'immenses immeubles qui eux-même constituent des villes de plus en plus grandes. La subdivision du travail qui en découle fait que chacun d'entre nous n'est plus qu'un petit rouage dans l'immense usine que constitue l'organisation de notre humanité actuelle. Nous trouvons normal de nous déplacer avec une tonne et demie de ferraille, d'avoir chaud quand le temps est froid et que nos habitations soient fraîches lorsqu'il fait chaud.*

*Nous trouvons normal d'avoir de l'eau lorsqu'on ouvre un robinet, d'être éclairés lorsque nous tournons l'interrupteur et de voir nos déchets disparaître lorsque nous actionnons la chasse d'eau.*

*Nous trouvons normal de pouvoir séjourner en hiver au bord d'une mer tiède grâce à l'avion, d'aller faire nos achats de Noël à Londres ou à New-York.*

*Nous trouvons normal qu'on abatte des forêts entières pour produire le papier de nos éphémères journaux, qu'on abatte chaque jour des millions de poulets, de porcs et de vaches pour notre nourriture journalière, qu'on épande largement des herbicides des pesticides et des fongicides pour produire en quantité suffisante les céréales nécessaires à notre alimentation.*

*Nous trouvons normal d'arracher à la croûte terrestre des milliards de tonnes de minerais pour produire tous les objets dont nous ne pouvons plus nous passer.*

*Nous trouvons normal de brûler quotidiennement 10 millions de tonnes de charbon, 15 millions de m<sup>3</sup> de pétrole et 10 milliards de m<sup>3</sup> de gaz.*

### *Nous avons tous une addiction à l'énergie*

*Pour prendre conscience de la valeur de l'énergie que nous consommons, oublions les joules, les calories et les watts et imaginons une unité d'énergie plus prosaïque : **la journée de pédalage**. Si vous pédalez énergiquement sur un vélo d'appartement pendant une journée entière, vous aurez dépensé (ou produit si vous êtes relié à un générateur d'électricité) à peu près un kWh. Notez que votre fournisseur d'électricité ne vous facture que quelques centimes pour ce kWh. L'énergie est vraiment bon marché !*

*Pour assurer notre confort et le bien être dans lesquels nous baignons, nous avons recours à une très grande quantité d'énergie. Toutes énergies confondues, transport, chauffage et énergie grise, nous induisons une consommation journalière d'environ 100 kWh. Rappelons qu'un kWh correspond à une journée de pédalage. Nous induisons donc chaque jour une quantité d'énergie équivalant à plus de trois mois de pédalage !*

*En faits, nous engendrons une dépense d'énergie chaque fois que nous envisageons la moindre dépense. Le consommation d'énergie est donc proportionnelle au revenu de chacun, et la dépense totale d'énergie d'une communauté est proportionnelle à son produit intérieur brut (PIB)*

*Notre niveau de vie et notre confort sont étroitement liés à notre facilité d'utiliser une grande quantité d'énergie. Nous sommes des victimes consentantes de notre addiction d'énergie et nous n'avons surtout aucune intention de suivre une cure de désintoxication !*

### **La production d'énergie, source de pollution**

*Le recours à l'énergie induit inmanquablement une pollution. Il y a une relation directe entre l'usage de sources d'énergie et la pollution. Que ce soit dans le recours à l'énergie ou dans la quantité de pollution qui accompagne notre mode de vie, on retrouve une même relation :*

$$Q_P = k (N \times R), \text{ pour la pollution} \qquad Q_E = k (N \times R), \text{ pour l'énergie}$$

*où  $Q_P$  et  $Q_E$  sont respectivement la quantité de pollution et d'énergie,  $N$  le nombre d'individus,  $R$  le revenu moyen de chacun et  $k$  un facteur qui tient compte des mesures prises pour diminuer la pollution ou modérer la consommation d'énergie. Il en ressort clairement que chaque fois que nous recourons à de l'énergie, nous induisons une pollution.*

### **L'énergie hydroélectrique**

*L'énergie hydroélectrique est la seule énergie qui n'implique aucune charge polluante notable pour notre environnement, si ce n'est l'impact de l'implantation des barrages sur le régime des rivières et sur la faune. Si on ne tient pas compte de l'avis des poissons, on peut considérer l'énergie hydroélectrique comme globalement peu perturbatrice de l'environnement.*

### **Les combustibles fossiles polluent l'atmosphère**

*Il n'en va pas de même des combustibles fossiles, charbon, pétrole, gaz, qui polluent gravement l'atmosphère :*

- ils consomment des quantités importantes d'oxygène,
- ils rejettent des gaz nocifs à la vie ( $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$  etc...),
- ils rejettent des poussières souvent chargées de métaux lourds,
- ils nous laissent des quantités importantes de cendres chargées de produits toxiques.



*L'accumulation de ces rejets dans l'atmosphère cause en premier lieu une nuisance directe importante sur la santé publique et, en second lieu, tendrait à modifier l'équilibre de l'effet de serre naturel qui contrôle la température moyenne de notre planète.*

## *Le gaz naturel, un combustible “propre” ?*

*Les milieux écologistes et les autorités politiques nous assurent que le gaz naturel est plus “propre” que le mazout ou le charbon. C’est partiellement vrai dans le sens qu’à production de chaleur égale, le gaz naturel rejette environ 30% de moins de CO<sub>2</sub> que le pétrole ou le charbon. C’est un point de vue ! Mais il en rejette tout de même des quantités considérables !*

*Mais ce qu’on ne nous dit pas, c’est que le gaz naturel est constitué essentiellement de méthane, un gaz à effet de serre trente fois plus efficace que le CO<sub>2</sub>, et que les fuites, engendrées inmanquablement par les milliers de kilomètres de conduites souterraines, contribuent largement à l’augmentation de l’effet de serre. Le gaz naturel n’est donc pas si innocent qu’on veut bien nous le faire croire.*

## *L’hydrogène n’est qu’un vecteur d’énergie*

*Oui, la combustion de l’hydrogène ne rejette dans l’atmosphère que de l’eau et, à ce titre, cela semble séduisant. Mais on ne nous dit pas où prendre l’hydrogène !*

*Il y a plusieurs façons de produire l’hydrogène mais toutes sont dévoreuses d’énergie. Là aussi, comme l’électricité, l’hydrogène n’est qu’un **vecteur d’énergie**. En brûlant, il ne fait que restituer une petite partie de l’énergie qu’on a dû dépenser pour le produire. Et si sa consommation est non polluante, sa production, elle, est très polluante car elle nécessite des centrales électriques.*

## *Le cas du combustible nucléaire*

*L’énergie dite nucléaire tire sa source du dégagement de chaleur qui accompagne le phénomène de fission<sup>12</sup> de l’uranium. On doit considérer l’uranium comme un combustible dont l’impact sur l’environnement est différent de celui des combustibles fossiles.*

*Si la fission de l’uranium ne consomme pas d’oxygène, ne rejette ni gaz ni poussière ni ne perturbe l’effet de serre, son utilisation est soumise à des risques d’un autre ordre et les déchets radioactifs qu’elle produit posent des problèmes d’entreposage et de stockage.*

*Vous pouvez m’accuser de mauvaise foi et vous auriez partiellement raison! J’ai écrit ces lignes pour souligner surtout combien notre confort est dépendant de l’énergie !*



## *Le devenir de l'Homme ?*

*Notre confort implique que nous ne pouvons pas faire autrement que d'utiliser le charbon pour alimenter les hauts fourneaux qui produisent l'acier, des combustibles fossiles pour produire le ciment, assurer le transport de toutes les marchandises dont nous avons besoin, nous chauffer et faire fonctionner les tracteurs de nos paysans. Il faut encore des hydrocarbures pour produire les plastiques qui ont envahi notre quotidien. Il faut encore énormément d'énergie pour arracher à la terre les minerais dont nous avons besoin. Non, nous n'arriverons pas à nous passer des combustibles fossiles. Le CO<sub>2</sub> que leur combustion engendre, continuera d'alimenter l'atmosphère.*

*Les COP successives ne pourront en rien faire diminuer la production de CO<sub>2</sub>. L'Homme est vraiment naïf de penser qu'il pourrait intervenir sur le changement climatique. Il faudrait plutôt, dans un premier temps, songer à nous adapter au changement climatique si celui-ci devrait se poursuivre. Améliorer le climat n'est pas de la compétence des hommes, mais améliorer la qualité de notre environnement immédiat est possible.*

### *Une fuite en avant*

*Nous sommes pris dans une immense fuite en avant que l'augmentation incontrôlable de la population et notre addiction à l'énergie provoquent.*

*Ce ne sera que la raréfaction des sources d'énergie qui provoquera, dans un avenir difficile à estimer, des changements qui risquent d'être radicaux et engendrer des troubles sociaux.*

*L'augmentation inéluctable du prix de l'énergie entraînera la disparition progressive du trafic aérien, la disparition des revenus touristiques des pays lointains, des inégalités entre les pauvres qui ne pourront plus se chauffer ni rouler en voiture et les riches qui continueront encore un peu à vivre confortablement. La raréfaction de l'énergie*

#### *Pour assurer notre confort\**

*Les **combustibles fossiles** polluent gravement l'atmosphère, attentent à notre santé et contribuent, peut-être, au réchauffement de la Planète.*

*L'**énergie nucléaire** ne perturbe pas l'atmosphère mais fait peser sur nous des risques d'un autre ordre et nous laisse des déchets désagréables à gérer !*

*Nous devons donc impérativement choisir entre ces deux types de pollution si nous voulons faire perdurer notre confort !*

*provoquera certainement une inflation et un chômage important. Pour s'approprier les dernières sources d'énergie, il y aura probablement des conflits armés entre nations.*

*Quant à la Planète, elle rira bien de nos malheurs et elle attendra patiemment que cette bizarre espèce humaine disparaisse comme bien d'autres ont déjà disparues avant elle. Elle pourra alors restaurer tranquillement ses forêts, ses lacs, ses rivières, vision imaginaire d'un paradis perdu qui symboliserait le monde avant l'apparition de j'Homme !*

*Cette vision apocalyptique présente certaines analogies avec le texte biblique. Les discours prophétiques des écologistes, le jugement dernier qui fera porter la faute sur les industriels et les économistes et qui sauvera les écologistes angéliques de l'enfer du développement anarchique et les conduira dans le paradis du développement durable.*

*Ces considérations un peu outrancières de ma part ne concernent que moi. J'ai tout de même espoir et confiance dans le génie humain qui saura, espérons le, trouver une alternative à cette situation difficile.*

*Sic transit gloria mundi !*



*Diogène par Jean-Léon Gérôme, 1860. Walters Art Museum, Baltimore.*

«  
*Même le bronze subit le vieillissement du temps,  
 Mais ta renommée, Diogène, l'éternité ne la détruira point.  
 Car toi seul as montré aux mortels la gloire d'une vie indépendante  
 Et le sentier de l'existence heureuse le plus facile à parcourir. »*

*(vers gravés sur la tombe de Diogène, en 43)*

