

En savoir plus sur le CO₂ et l'effet de serre

ANiME

Association Neuchâteloise en Matière d'Énergie
Case postale 100 - 2014 Bôle

TABLE DES MATIÈRES :

1. Définition et généralités sur le CO₂ (Le CO₂, c'est quoi ?)

- 1.1 Définition
- 1.2 Le CO₂ et la combustion
- 1.3 Les producteurs de CO₂ en Suisse par agent énergétique
- 1.4 Les producteurs de CO₂ en Suisse par type d'utilisateur

2. Le CO₂ et l'effet de serre

- 2.1 Le mécanisme de l'effet de serre
- 2.2 Historique
- 2.3 L'effet de serre et le réchauffement de la planète
- 2.4 Les principaux gaz à effet de serre
 - 2.4.1. Quels sont les gaz qui font le plus d'effet de serre et d'où viennent-ils ?
 - 2.4.2. Combien de temps restent-ils dans l'atmosphère ?
 - 2.4.3. Comment se comparent-ils ?

3. Les puits de CO₂

- 3.1 Définition d'un puits de CO₂
- 3.2 Le cycle du carbone
- 3.3 L'océan puits de stockage du CO₂ anthropique.
- 3.4 La biosphère, l'autre puits de CO₂
 - 3.4.1. L'importance de la forêt dans le bilan de CO₂
 - 3.4.2. Bien utiliser le bois soulage le climat

INTRODUCTION

La planète Terre, avec une température de surface moyenne de l'ordre de 15°C, présente des conditions climatiques très favorables pour la vie tant animale que végétale que nous connaissons aujourd'hui. Mais l'équilibre est subtil. L'effet de serre naturel joue ici un rôle particulièrement important puisque, sans sa présence, la température à la surface de la terre serait de l'ordre de -18°C !

Dossier **ANIME** CO₂

Il faut savoir que cet effet bénéfique tient à très peu de choses : la présence dans l'atmosphère de quelques gaz particuliers (vapeur d'eau, CO₂, méthane, ozone) dans une concentration globale inférieure à 1%.

L'activité humaine, et en particulier l'utilisation massive d'agents énergétiques fossiles, modifie sensiblement la teneur en CO₂ de l'atmosphère en menaçant le délicat équilibre qui s'était progressivement établi jusqu'à l'ère post-industrielle.

Les chiffres sont impressionnants : en Suisse, ce sont 41 millions de tonnes de ce gaz inodore et incolore qui sont discrètement dilués dans l'atmosphère chaque année. C'est beaucoup plus que l'ensemble des déchets ménagers que nous envoyons à la poubelle à raison de 3 millions de tonnes par année pour l'ensemble du pays !

Si l'on sait que le CO₂ émis aujourd'hui mettra près de 100 ans pour disparaître de l'atmosphère, ce n'est pas un excès de pessimisme que d'affirmer que des changements climatiques sont à craindre dans un proche avenir...

L'Association ANIME, fidèle à sa mission d'information, a jugé utile d'aborder le thème du CO₂ pour expliquer le phénomène de l'effet de serre et ses conséquences probables sur l'évolution du climat. Nous espérons que ce document apportera une contribution aux débats actuels concernant l'application de la loi sur le CO₂, et plus particulièrement sur l'introduction d'une taxe sur le CO₂ et du centime climatique sur les carburants.

1. Définition et généralités sur le CO₂

1.1 Définition

Le dioxyde de carbone est un gaz sans couleur, inodore, ininflammable constitué de deux atomes d'oxygène et d'un atome de carbone. Ce gaz est également appelé bioxyde de carbone, anhydride carbonique ou gaz carbonique. Sa formule moléculaire est CO₂, sa masse moléculaire est 44.01, son point d'ébullition se situe à -78.49°C et sa durée de vie dans l'atmosphère est située entre 70 et 90 ans.

Le CO₂ est produit quand n'importe quelle forme de carbone ou presque n'importe quel composé de carbone est brûlé dans un excès d'oxygène. Les sources d'émission naturelles du CO₂ sont la respiration animale et végétale, la décomposition des matières organiques et la fermentation, ainsi que les éruptions volcaniques, les feux de forêts et les océans. Les sources d'émission résultant de l'homme sont principalement l'utilisation des combustibles fossiles, l'incinération des déchets, la déforestation et les procédés industriels, tels que la production de ciment et de chaux.

Ce gaz est utilisé comme agent d'extinction des incendies, agent propulseur dans les aérosols, agent de fumigation, antiseptique en bactériologie et dans l'industrie des aliments congelés, gazéificateur de breuvage. On l'utilise également pour augmenter la production agricole (voir la vigueur des plantes poussant en bordure des autoroutes), pour la fabrication de carbonate et comme glace sèche pour la réfrigération.

1.2 Le CO₂ et la combustion

Principe de la combustion : exemple du méthane



L'équation chimique présentée ci-dessus montre le principe de la combustion d'un agent énergétique fossile simple : le méthane, soit le gaz naturel. Lors de la combustion, l'oxygène mis en présence du combustible permet d'oxyder les atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H) en donnant du gaz carbonique (CO₂) et de l'eau (H₂O), tout en libérant de l'énergie thermique.

La combustion : comparaison des principaux combustibles

Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques de la combustion des agents énergétiques les plus usités en Suisse.

(1)	3,85 kg d'ordures ménagères	=	8,30 kg CO ₂ + 10 kWh
	1,23 kg de charbon	=	4,35 kg CO ₂ + 10 kWh
(2)	2,25 kg de bois	=	4,17 kg CO ₂ + 10 kWh
	1,0 litre de mazout	=	2,60 kg CO ₂ + 10 kWh
	1,1 litre d'essence	=	2,40 kg CO ₂ + 10 kWh
	1,0 m ² de gaz naturel	=	2,00 kg CO ₂ + 10 kWh

(1) Valeurs tirées du document "Bilan des émissions polluantes et non polluantes des principales installations de chauffage, ANIME, février 1995".

(2) Il est admis que lors de la combustion du bois, le bilan CO₂ est considéré comme neutre. Cela provient du fait que la décomposition naturelle du bois en forêt produit la même quantité de CO₂ que s'il est brûlé dans une chaudière.

1.3 Les Producteurs de CO₂ en Suisse par agent énergétique (2004)

Le tableau ci-dessous donne la consommation d'énergie finale en Suisse en 2002 pour les principaux agents énergétiques. Sur la base des caractéristiques physico-chimiques données dans le paragraphe précédent, les émissions de CO₂ globales du pays ont été évaluées.

	Agent énergétique	Energie finale en 2002 [GWh]	Emissions [mio t CO₂]	
	Combustible liquide (mazout)	62'853	16.272	38.0%
	Carburant (essence)	76'406	18.338	45.0%
(1)	Electricité	56'172	0.966	2.3%
	Gaz naturel	29'433	5.887	13.0%
	Charbon	1'569	0.683	1.7%
(2)	Bois	6'314		
(3)	Chaleur à distance	4'256		
(4)	Ordures + déchets industriels	4'831		
(5)	Energies renouvelables	2'128		
	TOTAL	243'692	42.146	100%

- (1) En 2002, l'électricité produite en Suisse provient à 56,2% de centrales hydrauliques, à 39,5% de centrales nucléaires et à 4,3% de centrales thermiques. Dans notre estimation des émissions de CO₂, nous considérons uniquement la filière thermique, en faisant l'hypothèse d'une production à partir du gaz naturel avec un rendement moyen de 50%.
- (2) Le bilan des émissions de CO₂ lors de la combustion du bois est considéré comme neutre. La valeur indiquée ici est donnée à titre d'information.

- (3) Seule la part thermique valorisée lors de l'incinération des ordures ménagères est prise en compte dans cette catégorie. Il est admis un bilan neutre au niveau des émissions de CO₂ lors de la combustion des ordures ménagères, puisque que toute autre filière d'élimination serait responsable des mêmes valeurs d'émission.
- (4) Sont compris dans cette catégorie les ordures ménagères non valorisées dans un réseau de chauffage à distance, les boues d'épuration, les déchets industriels.
- (5) Sont compris dans cette catégorie l'énergie solaire, l'énergie éolienne, le biogaz et la chaleur de l'environnement.

Remarque :

La combustion des produits pétroliers est responsable de 83% des émissions de CO₂.

1.4 Les producteurs de CO₂ en Suisse par type d'utilisateur (2004)

Le tableau ci-dessous donne les émissions de CO₂ en Suisse en 2002 pour les principales catégories de consommateurs d'énergie.

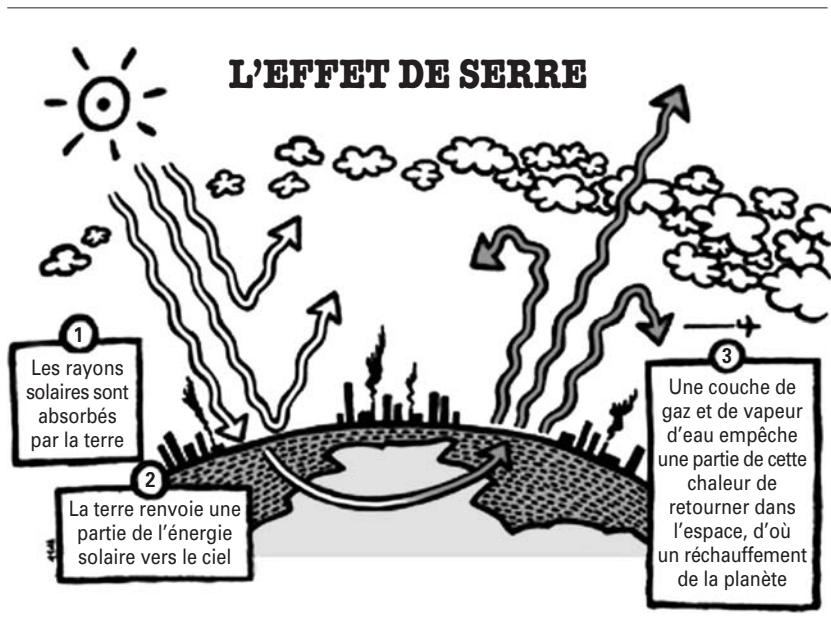
Catégorie de consommateurs	Emissions [mio t CO ₂]	
Ménages	12.079	28.7%
Industries	5.972	14.2%
Services	5.557	13.2%
Transports	18.537	43.9%
TOTAL	42.146	100%

2. Le CO₂ et l'effet de serre

2.1 Le mécanisme de l'effet de serre

L'effet de serre fonctionne de la même façon que les parois de verre dans une serre. L'effet de serre est un phénomène naturel par lequel une partie de l'énergie solaire qui est réfléctée par la terre est absorbée et retenue sous forme de chaleur dans la basse atmosphère.

Des gaz tel que la vapeur d'eau (H₂O), le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) retiennent le rayonnement émis par la terre réchauffée par les rayonnements du soleil. L'effet de serre est un phénomène nécessaire car sans lui, la nuit serait beaucoup trop froide (environ -24° C), et le jour serait beaucoup trop chaud. Les molécules de ces gaz agissent de la même façon qu'une couverture isolante en emprisonnant la chaleur.



2.2 L'effet de serre et le réchauffement de la planète

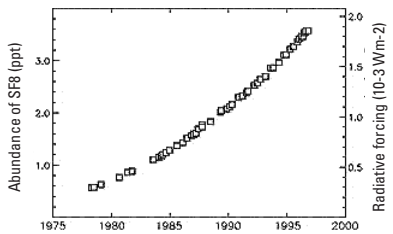
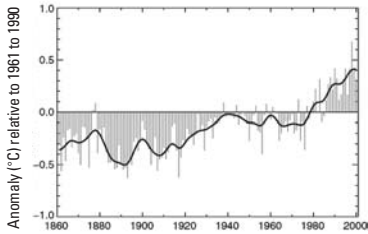
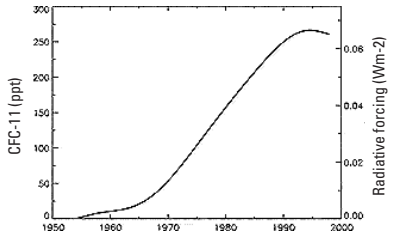
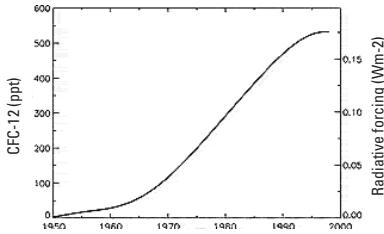
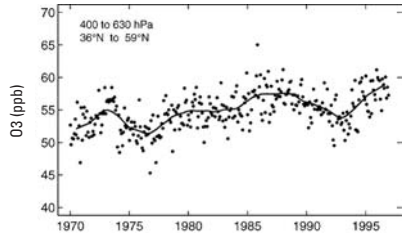
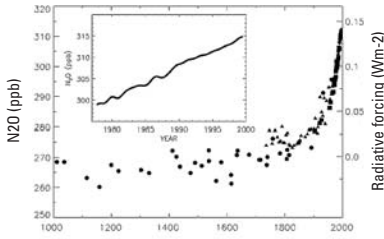
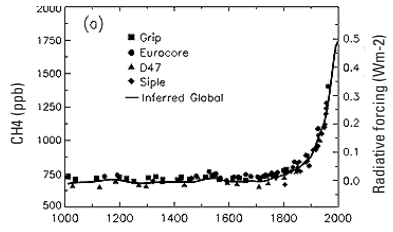
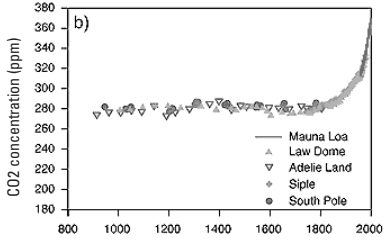
Les mesures de température prises par des appareils partout dans le monde ont révélé que pendant le XX^{ème} siècle, la surface de la terre et la partie la plus inférieure de l'atmosphère se sont réchauffées de 0.6°C en moyenne. Pendant cette période, les émissions de gaz résultant de l'activité humaine tels que le dioxyde de carbone, le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), l'ozone troposphérique (O₃), les CFC et les HCFC, ainsi que leur substituts (gaz de synthèse responsables de l'attaque de la couche d'ozone) ont considérablement augmenté, créant une hausse des concentrations dans l'atmosphère (voir courbes d'évolution).

Courbes d'évolution du CO₂, du méthane et de l'oxyde nitreux

Ces vingt dernières années, on a peu à peu associé, du moins en partie, l'émission de ces gaz, et principalement le CO₂, avec l'augmentation de température. Le phénomène est appelé "effet de serre".

Pour comprendre cette association, il faut tout d'abord savoir que la température moyenne de notre planète résulte de l'équilibre entre le flux de rayonnement qui lui parvient du soleil et le flux de rayonnement infrarouge renvoyé vers l'espace.

Le rayonnement du soleil, absorbé par le sol et l'atmosphère est réémis vers l'espace (sous forme infrarouge), après de multiples interactions avec les composants de l'atmosphère, contribuant ainsi à en réchauffer les couches inférieures. Agissant telles les vitres d'une serre, certains gaz (dont ceux dont on parle ci-dessus) présents en faible quantité dans l'atmosphère, interfèrent avec les rayons infrarouges en les empêchant directement de s'échapper vers l'espace. Cela provoque une hausse des températures à la surface de notre planète.



Source: GIEC 2001, Groupe d'Experts intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

2.3 Historique

En 1780, le savant et voyageur genevois Horace Bénédict de Saussure, montre expérimentalement, avec un dispositif constitué de cinq caisses de verre emboîtées les unes dans les autres et équipées de thermomètres, l'effet de l'énergie solaire sur l'air en fonction de l'altitude.

En 1824, le physicien J. Fourier décrit l'expérience de H. B. de Saussure et compare la terre avec son enveloppe atmosphérique à la boîte vitrée de savant genevois.

En 1860, le physicien irlandais J. Tyndall complète les observations et réflexions de de Saussure et Fourier avec l'analyse des propriétés optiques et radiatives des gaz et des vapeurs. Selon lui, toute variation de la quantité de vapeur d'eau, comme de CO₂, dans l'atmosphère, devrait se traduire par un changement climatique.

En 1896, le savant suédois Svante Arrhénius calcule que si le CO₂ disparaissait entièrement de notre atmosphère, la température du sol diminuerait de 21°C et engendrerait une diminution de la quantité de vapeur d'eau accentuant ainsi la diminution de la température. Il estime qu'une augmentation du double du volume de CO₂ devrait permettre de gagner 4°C.

Il en conclut que l'activité industrielle pourrait être une solution technique pour repousser la prochaine ère glaciaire.

En 1924, Vernadsky souligne l'impact de la déforestation sur le cycle dynamique du CO₂.

En 1957-1958, les études sur les paléoclimats sont lancées et la mesure systématique de la teneur en CO₂ dans l'atmosphère, grâce au carottage des glaces de l'Antarctique, commence alors. Le géochimiste C. D. Keeling observe les variations saisonnières et l'augmentation annuelle moyenne du CO₂ dans l'atmosphère.

En 1997, protocole de Kyoto, cet accord est le premier pas, a-t-on dit, vers la résolution du problème environnemental le plus alarmant, le réchauffement de la planète, causé essentiellement par les émissions dues à la combustion du charbon, du pétrole et du gaz naturel.

En 1999, mise en vigueur de la loi fédérale sur la réduction émission CO₂ (Loi sur le CO₂).

En décembre 2004, conférence mondiale sur le climat à Buenos Aires.

16 Février 2005, après des années de controverses diplomatiques, le fameux protocole de Kyoto entre enfin en vigueur (sans les américains).

Dès 2006, en Suisse, mise en place d'une taxe sur le CO₂ sur les combustibles et centime climatique "à l'essai" sur les carburants.

2.4 Les principaux gaz à effet de serre

Nous savons que les principaux gaz à effet de serre sont :

- la vapeur d'eau (H₂O),
- le gaz carbonique (CO₂).

Il en existe d'autres. Certains sont "naturels", c'est-à-dire qu'ils étaient présents dans l'atmosphère avant l'apparition de l'homme, d'autres sont "artificiels" : il s'agit de gaz industriels qui ne sont présents dans l'atmosphère qu'à cause de l'homme.

Les autres gaz "naturels" à effet de serre sont :

- le méthane (CH₄), qui n'est rien d'autre que... le gaz naturel de nos cuisinières,
- le protoxyde d'azote (N₂O), nom savant du... gaz hilarant (qui ici ne l'est plus tellement),
- l'ozone (O₃), forme particulière de l'oxygène.

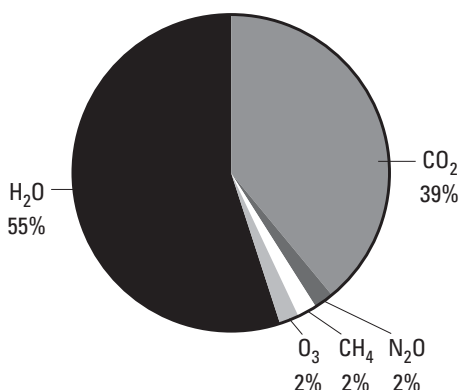
Les principaux gaz industriels à effet de serre sont les halo carbures (formule générique de type C_xH_yHal_z où Hal représente un ou plusieurs halogènes) : il s'agit d'une vaste famille de gaz obtenus en remplaçant, dans une molécule d'hydrocarbure (le propane, le butane, ou encore l'octane, que l'on trouve dans l'essence, sont des hydrocarbures), de l'hydrogène par un gaz halogène (le fluor, le chlore...). Les molécules ainsi obtenues ont deux propriétés importantes pour nous :

- Elles absorbent très fortement les infrarouges, beaucoup plus que le gaz carbonique;
- Elles sont très "solides" : la partie la plus "énergique" du rayonnement solaire (les ultraviolets et les rayons cosmiques) met très longtemps à "casser" ces molécules une fois qu'elles sont dans l'atmosphère ; elles y restent donc (dans l'atmosphère) très longtemps.

Il existe également un autre gaz industriel que l'on mentionne souvent dans les milieux spécialisés, l'hexafluorure de soufre (SF_6). Il n'est pas d'utilisation banale mais est encore plus absorbant pour les infrarouges et résistant à la partie "dure" du rayonnement solaire que les halo carbures.

2.4.1 Quels sont les gaz qui font le plus d'effet de serre et d'où viennent-ils ?

Le gaz qui fait le plus d'effet de serre est... la vapeur d'eau.



Mais si l'on se limite à l'effet de serre d'origine humaine, que l'on appelle parfois effet de serre "additionnel" (parce qu'il se rajoute à celui d'origine naturelle), ou anthropique, il est causé :

Pour 65% par le gaz carbonique. Il y a bien sûr des émissions naturelles (notre respiration, celle des animaux, une partie de la putréfaction, les incendies naturels...).

Le gaz carbonique venant des activités humaines (on parle d'émissions anthropiques, c'est-à-dire provoquées par l'homme) provient :

- pour l'essentiel de la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz);
- un peu de certaines industries (par exemple pour la production de ciment).

Pour 20% par le méthane. Le méthane est un gaz (c'est le fameux "gaz naturel") qui se forme dès qu'un composé organique (un animal, une plante) pourrit, particulièrement si cette putréfaction se passe sans air (en fait sans oxygène), par exemple au fond de l'eau ou sous terre. Les réserves de gaz naturel ne se sont pas formées autrement que par la décomposition, il y a très longtemps, de plantes et d'animaux. Une partie du méthane présent dans l'atmosphère est donc d'origine parfaitement naturelle : ce n'est pas l'homme qui est responsable du pourrissement !

Mais l'homme y rajoute sa part. Le méthane d'origine humaine provient :

- de l'élevage des ruminants (vaches, moutons, chèvres, yaks...), car leur digestion inclut de la putréfaction,
- de la culture du riz, car les zones humides en général émettent du méthane (comme nos marécages : les feux follets ne sont rien d'autre que la combustion spontanée du méthane produit au fond des marécages, là où les plantes pourrissent sans air),
- des décharges d'ordures ménagères (encore le pourrissement) et du compostage,
- des exploitations pétrolières et gazières, à cause des fuites de gaz naturel.

Pour 10% par les halocarbures (pas d'émissions naturelles). Ces gaz sont utilisés :

- auparavant comme gaz propulseurs (les fameux CFC de nos bombes aérosol d'insecticide ou de "sent-bon"), maintenant progressivement interdits par la convention de Montréal, car ils sont aussi responsables de la diminution de l'ozone en haute altitude;
- actuellement comme gaz réfrigérants (dans les systèmes de climatisation et les chaînes du froid) ; les émissions proviennent désormais essentiellement des fuites et mise à la décharge des systèmes de climatisation;
- dans certains procédés industriels (fabrication de mousses plastiques, mais aussi... de composants d'ordinateurs).

Pour 5% par le protoxyde d'azote (N₂O). Pour ce gaz il y a aussi des émissions naturelles qui proviennent essentiellement des zones humides (et aussi... des termites !). La part "humaine" (anthropique) provient :

- de l'utilisation des engrais azotés en agriculture;
- de certains procédés chimiques.

Pour environ 5% par l'ozone (O₃) troposphérique. L'ozone est une variante de l'oxygène (une molécule d'ozone comporte trois atomes d'oxygène au lieu de deux pour le gaz "oxygène" normal) qui est naturellement présent dans l'atmosphère. Selon l'endroit où il se trouve, il nous intéresse beaucoup ou il nous est nuisible :

- dans la haute atmosphère, où l'on parle d'ozone stratosphérique (la stratosphère est la couche de l'atmosphère située entre 10 et 50 km d'altitude), il arrête les ultraviolets du soleil ; il nous y est très utile (sans cette couche d'ozone stratosphérique la vie n'existerait peut-être pas sur Terre),
- dans nos villes, il est un polluant local très agressif ; il n'y est donc pas souhaitable. L'ozone troposphérique (la troposphère est la couche la plus basse de l'atmosphère, celle qui "touche" le sol) est l'un des composants de la pollution locale, et provient indirectement de la combustion d'hydrocarbures. Ce terme de l'effet de serre est donc - outre le CO₂ - une conséquence du transport (terrestre, mais aussi aérien, on y revient plus loin).

Depuis le début de l'ère industrielle, c'est-à-dire depuis l'année 1750 environ, ce que nous avons mis dans l'atmosphère a pour effet d'introduire un "forçage radiatif" de l'ordre de 1% du rayonnement reçu.

Dit autrement, à travers ses émissions de gaz à effet de serre l'homme a modifié la situation "comme si" le soleil avait augmenté sa puissance de 1%. Cela peut paraître peu. Pourtant, compte tenu des énergies considérables qui sont en jeu, de la fragilité de certains équilibres naturels, et du fait que ces effets agissent sur de longues périodes, c'est très significatif pour notre avenir.

2.4.2. Combien de temps restent-ils dans l'atmosphère ?

Les gaz à effet de serre, une fois dans l'atmosphère, n'y restent cependant pas éternellement. Ils peuvent être retirés de l'atmosphère :

- soit par suite d'un phénomène physique. Par exemple la pluie, phénomène physique (condensation), enlève de la vapeur d'eau de l'atmosphère;
- soit par suite d'un phénomène chimique. Par exemple la photosynthèse des plantes enlève du gaz carbonique de l'atmosphère;
- soit par suite d'un phénomène radiatif. Par exemple les rayons cosmiques (qui sont de même nature que les rayons émis par une source radioactive) "cassent" des molécules dans la haute atmosphère. Les halocarbures disparaissent de cette façon (ce sont généralement des molécules trop stables pour disparaître par réaction chimique dans l'atmosphère).

Mais la très mauvaise surprise, c'est que mis à part la vapeur d'eau qui s'évacue en quelques jours, les gaz à effet de serre mettent très longtemps à s'en aller de l'atmosphère. Ce n'est pas facile de savoir avec précision combien de temps est nécessaire, car l'atmosphère est un système très complexe, faisant intervenir tout un ensemble de phénomènes (physiques, chimiques, biologiques...), dont les scientifiques n'ont pas encore percé tous les mystères, même s'ils en savent assez pour nous mettre en garde.

Cela étant, on a désormais une estimation de la durée de séjour, c'est-à-dire du temps qui est nécessaire à ce que le gaz en surplus disparaisse de l'atmosphère, pour les principaux d'entre eux.

Gaz	Durée de séjour approximative dans l'atmosphère
Gaz carbonique	100 ans
Méthane	12 ans
Protoxyde d'azote	120 ans
Halocarbures	jusqu'à 50'000 ans

On voit immédiatement ci-dessus que l'essentiel des gaz que nous émettons aujourd'hui, y compris le gaz carbonique que nous avons par exemple émis ce matin en venant travailler en voiture, ou hier en faisant fonctionner la chaudière, sera encore au-dessus de la tête de nos petits-enfants dans un ou deux siècles.

2.4.3. Comment se comparent-ils ?

Afin de pouvoir faire des comparaisons, on a la possibilité de calculer, pour chacun des gaz à effet de serre, un "pouvoir de réchauffement global" ou PRG, qui permet de savoir de combien on augmente l'effet de serre lorsque l'on émet un kg du gaz considéré.

Ce PRG tient compte de deux données : les raies d'absorption dans l'infrarouge du gaz considéré (qui donnent la "puissance" instantanée) et sa durée de vie dans l'atmosphère (qui donne la durée sur laquelle il faut intégrer la "puissance" pour obtenir un impact énergétique à terme).

Il s'exprime en Watts par mètre carré.

On a aussi coutume de tout ramener au gaz carbonique, et de parler alors de PRG relatif. Par définition le PRG relatif du gaz carbonique vaut 1, et on regarde ce qu'il vaut pour les autres gaz. On obtient le tableau suivant (les Perfluorocarbures et Hydrofluorocarbures sont des halocarbures particuliers).

Gaz	Formule	PRG relatif / CO₂
Gaz carbonique	CO ₂	1
Méthane	CH ₄	21
Protoxyde d'azote	N ₂ O	310
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	6'500 à 8'700
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	140 à 11'700
Hexafluorure de soufre	SF ₆	23'900

Ce que signifie le tableau ci-dessus, c'est donc que si on met 1 kg de méthane dans l'atmosphère, on fait 21 fois plus d'effet de serre que si on met 1 kg de gaz carbonique.

Si on met 1 kg d'hexafluorure de soufre dans l'atmosphère, on fait 23'900 fois plus d'effet de serre que si on met un kg de gaz carbonique : l'effet de serre d'un kg de ce gaz "vaut" 23,9 tonnes de CO₂, c'est-à-dire plus que l'émission annuelle de quatre Suisses ! Heureusement nous en émettons de toutes petites quantités pour le moment.

Enfin plutôt que de mesurer le poids de gaz carbonique, les économistes ont pris l'habitude de parler d'équivalent carbone.

Par définition, un kg de CO₂ vaut 0,2727 kg d'équivalent carbone, c'est-à-dire le poids du carbone seul dans le composé "gaz carbonique". Pour les autres gaz, l'équivalent carbone vaut : équivalent carbone = PRG relatif x 0.2727. Pour les principaux gaz à effet de serre, par exemple, les équivalents carbones sont les suivants:

Gaz	Formule	Equivalent carbone/kg
Gaz carbonique	CO ₂	0.273
Méthane	CH ₄	5.73
Protoxyde d'azote	N ₂ O	84.55
Perfluorocarbures	C _n F _{2n+2}	1772.73 à 2372.73
Hydrofluorocarbures	C _n H _m F _p	38.20 à 3190.9
Hexafluorure de soufre	SF ₆	6518.2

3. Les puits de CO₂

Avant le XIX^{ème} siècle, le CO₂ atmosphérique était stable à 3% près, oscillant autour d'une teneur en volume de 0,028%, soit 280 parties par million volume (280 ppmv) correspondant à une masse de 600 milliards de tonnes de carbone (600 GtC). Depuis le début de l'ère industrielle vers 1800, et surtout depuis 1950, un net accroissement du CO₂ atmosphérique est constaté, atteignant une valeur supérieure à 360 ppmv en 1995, et un taux d'accroissement de l'ordre de 0,5% par an.

Cette corrélation entre activité humaine et CO₂ n'est par fortuite. En effet, il est estimé que la combustion des énergies fossiles et la déforestation ont "relargué" au total quelques 350 GtC dans l'atmosphère depuis 1800. Le CO₂ étant une molécule stable dans l'atmosphère, une telle quantité aurait dû conduire à des concentrations atmosphériques en CO₂ de l'ordre de 450 ppmv à la fin du XX^{ème} siècle. Or, il n'en est rien puisque l'augmentation observée en 1995 n'est que de 29%, au lieu de 60%. Ceci indique que : l'augmentation du CO₂ atmosphérique est d'origine anthropique et que les réservoirs naturels (océan et biosphère continentale) ont réabsorbés près de la moitié des rejets anthropiques.

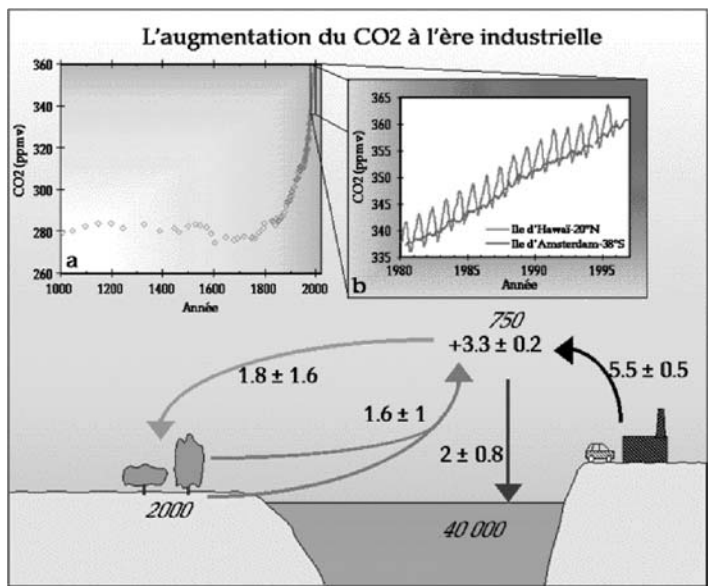


Fig. 3.1. Augmentation du CO₂ à l'ère industrielle

Selon la figure 3.1, l'augmentation du CO₂ à l'ère industrielle, les quantités de carbone (GtC) stockées dans les trois réservoirs naturels (atmosphère, océan, biosphère continentale) sont indiquées en italique, tandis que les flux nets d'échange (GtC/an), lors de la décennie 1980-90, sont en gras (d'après le GIEC, 1995). Les flux dus aux combustions des énergies fossiles et à la déforestation sont également indiqués. On notera l'accumulation de 3,3 GtC/an dans l'atmosphère, soit une augmentation du CO₂ de 1,5 ppmv/an. Enfin, l'évolution du CO₂ depuis l'époque préindustrielle est indiquée dans les deux cadres. Cadre a : reconstitution sur le dernier millénaire à partir des archives glaciaires (Lgge-Grenoble notamment), et de l'enregistrement effectué à Hawaï depuis 1957 (Sio-La Jolla). Cadre b : évolution récente du CO₂ dans les deux hémisphères (Hawaï/Noaa-Boulder, Amsterdam/Cfr-Gif), on remarquera la forte saisonnalité

boréale liée à la prépondérance de la végétation continentale, ainsi que les anomalies interannuelles, positives en 82/83 et 87/88 lors des événements climatiques El Niño, et négative en 91/93 suite à l'éruption du volcan Pinatubo.

3.1 Définition d'un puits de CO₂

Le Département fédéral de l'Environnement, des Transports, de l'Energie et de la Communication (D ETEC) définit un puits de CO₂ de la manière suivante :

Dans le jargon de la convention, le terme de "puits" désigne les processus qui fixent à moyen et à long terme du CO₂ et contribuent ainsi à réduire les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère. Les écosystèmes, les forêts en particulier, les terrains agricoles, les océans peuvent fonctionner comme des puits naturels de CO₂.

Les capacités de stockage des puits de CO₂ ne sont pas illimitées. La croissance des arbres est un puits de CO₂ car elle permet de stocker pendant une longue période le CO₂ sous forme de carbone dans la biomasse. Le "puits est rempli quand les arbres ont achevé leur croissance, soit en 100 - 300 ans sous nos latitudes ou 30 - 150 ans sous les tropiques. Lorsque la forêt est exploitée de manière intensive, elle se transforme en une source d'émission : le CO₂ contenu dans le bois est libéré par décomposition et/ou combustion ou lors de l'élimination du bois qui a été utilisé comme matériel de construction. Le bilan du CO₂ est équilibré si la forêt est gérée de manière durable, c'est-à-dire lorsque l'on ne récolte pas plus de bois qu'il n'en repousse.

Selon les méthodes de culture utilisées, les terrains agricoles peuvent également faire office de puits par leur enrichissement en CO₂. La formation d'humus augmente la teneur en carbone du sol. Inversement, si l'exploitation des terrains entraîne un phénomène d'érosion ou une diminution de la couche d'humus, le sol libère du carbone et devient ainsi une source de CO₂.

3.2 Le cycle du carbone

Le cycle du carbone peut être très grossièrement schématisé comme suit : le carbone atmosphérique fixé par la biosphère ou par l'océan est relâché dans l'atmosphère quelques heures, ou plusieurs millénaires plus tard, selon les processus mis en jeu. Ainsi, en situation de quasi-équilibre, il y a environ autant de carbone fixé que relâché. Sur des constantes de temps de quelques siècles, et sans changement climatique notable, on observe effectivement une concentration de CO_2 à peu près constante, donc des puits océaniques et biosphériques (biosphère continentale) globalement nuls. Les processus qui régissent la fixation et le relâchement du carbone dépendant du climat, une variation de celui-ci entraînera une modification de la concentration de quasi-équilibre de CO_2 . Sur des constantes de temps de plusieurs milliers d'années, les paléodonnées issues des carottes de glace nous montrent que la dépendance de la concentration de CO_2 avec la température moyenne du globe est d'environ 20 ppm/°C.

Aujourd'hui, l'accroissement du CO_2 atmosphérique favorise la fixation du carbone par les plantes et l'océan (effet de fertilisation biosphérique et augmentation de l'échange diffusif air-mer). Ce carbone fixé étant relâché dans l'atmosphère avec un certain délai (nous nous intéressons ici aux périodes allant de l'année à quelques siècles), l'accroissement rapide de CO_2 entretient une augmentation du flux net de carbone stocké par la biosphère et l'océan. Les puits de carbone tant biosphérique qu'océanique ont ainsi tendance à croître, ce qui explique que seule environ la moitié du CO_2 , relâché actuellement par l'homme dans l'atmosphère, y reste.

Des études récentes ont montré que le changement climatique résultant de l'accroissement du CO_2 pourrait réduire de façon significative l'efficacité de ces puits de CO_2 , et donc pourrait introduire un effet amplificateur (c'est-à-dire une rétroaction positive) entre climat et cycle du carbone.

3.3 L'océan, puits de stockage du CO₂ anthropique

Le système océanique contient près de 60 fois plus de carbone que le réservoir atmosphérique. Schématiquement la distribution du carbone est contrôlée par deux "pompes" : la pompe de solubilité, régie par l'équilibre thermodynamique du CO₂ à l'interface air-mer ; et la pompe biologique, régie par l'activité de la biomasse marine. A l'époque préindustrielle, les sources équatoriales de CO₂, dues au réchauffement des masses d'eau et à la remontée d'eau profonde riche en carbonates, étaient grossièrement compensées par les puits aux moyennes et hautes latitudes (refroidissement et activité biologique). Depuis deux siècles, ce pseudo équilibre a été profondément affecté par l'augmentation brutale du CO₂ atmosphérique.

Tout d'abord, la pompe de solubilité est perturbée par l'excès de CO₂ atmosphérique qui se dissout dans les eaux de surface. Toutefois, la capacité de dilution océanique, a priori dans un rapport de 1 à 60, est fortement limitée par les deux processus suivant :

- Le premier est chimique

Le CO₂ dissout réagit avec l'eau pour donner de l'acide carbonique (H₂CO₃), lui-même en équilibre acido-basique avec le carbonate (CO₃⁻) et le bicarbonate (HCO₃⁻), or cette dernière forme représente près de 95% du carbone océanique. Pratiquement, une augmentation de 10% du CO₂ atmosphérique, accompagnée d'une dissolution et d'une acidification, conduit seulement à une augmentation de 1% du bicarbonate. Ainsi, la capacité potentielle de dilution de l'océan global vis-à-vis d'une perturbation atmosphérique, est ramenée dans un rapport de 1 à 6.

- Le deuxième est dynamique

Les eaux de surface sont en contact rapide, de l'ordre de l'année, avec l'atmosphère. Or elles ne représentent qu'à peine 2% de la masse océanique, conduisant à une capacité de dilution négligeable (1 à 0.1). De fait, seul le mélange avec les eaux de sub-surface, intermédiaire ou profonde est efficace; par contre il est lent, de quelques dizaines d'années à quelques siècles. En deux mots, l'océan profond peu stocker du carbone, mais il est difficilement accessible.

Quant à la pompe biologique, il a souvent été assumé que l'augmentation de CO₂ atmosphérique ne la perturbait pas ; le carbone n'étant pas a priori un nutriment limitant. Ceci implique un rôle négligeable sur le CO₂ atmosphérique, à l'instar d'une forêt primitive qui fixerait chaque année autant de carbone qu'elle en relarguerait suite à la décomposition de ses feuilles, troncs et racines. Toutefois, des études récentes indiquent qu'une double déstabilisation de la biologie marine serait à l'oeuvre :

- l'augmentation de CO₂ dissout agit sur la photosynthèse et sur l'utilisation des nutriments limitants (N et P) ;
- un changement du climat, et donc de circulation océanique, pourrait perturber notablement les champs de nutriments et de carbonates.

3.4 La biosphère, l'autre puits de CO₂.

Au contraire de l'océan, la végétation continentale et les sols ne contiennent que trois fois plus de carbone que l'atmosphère. C'est un milieu extrêmement perturbé par l'homme, en raison de l'utilisation des sols (déforestation, reforestation, contrôle des feux, etc.), et de l'augmentation du CO₂ atmosphérique et des retombées azotées, conduisant à une double fertilisation de la biosphère terrestre. De plus, la biomasse continentale est directement influencée par les variations climatiques (température, précipitations). Enfin, ses constantes de temps rapides (qq. années à qq. décennies), sa diversité et son hétérogénéité en font le réservoir de carbone actuellement le plus méconnu, mais non le moindre. En effet, les études atmosphériques (cf. ci-dessus) indiquent que, malgré une déforestation autour de la GtC/an, la biomasse pourrait être soit à l'équilibre, soit même un puits de carbone comparable à l'océan.

3.4.1 L'importance de la forêt dans le bilan de CO₂

L'histoire et la géographie régionale enseignaient que la forêt livre du bois, protège les villages des avalanches, ralentit l'érosion et abrite de nombreuses espèces d'animaux et de végétaux. Aujourd'hui, la forêt assume une fonction de plus : en fixant la gaz carbonique, elle contribue à réduire les émanations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère

La surface forestière de la Suisse a augmenté au siècle dernier, passant de 8'000 à 12'000 km². Ces dernières décennies, on a en outre utilisé moins de bois, de sorte que les réserves ont augmenté. En conséquence, le volume de carbone retiré du CO₂ de l'atmosphère et fixé par la forêt a lui aussi augmenté. En 1998, la forêt suisse a contribué à améliorer le bilan du CO₂ de la manière indiquée dans le tableau 2.

Au cours des dix dernières années, l'effet de puits de la forêt suisse se situait entre 5,5 et 6 millions de tonnes de CO₂ par an. Les tempêtes comme Vivian ou Lothar peuvent toutefois modifier considérablement ce bilan. En 1990, après Vivian, l'effet est tombé à 2,3 millions de tonnes de CO₂. Lothar a même fait de la forêt suisse une source : les arbres détruits ont libéré quelque 8 à 9 millions de tonnes de CO₂.

Ces chiffres montrent que la manière dont la forêt sera utilisée et entretenue est décisive pour le bilan du CO₂. L'utilisation qui est faite du bois n'est pas la seule à compter. La durée pendant laquelle on laisse pousser les arbres et la prévention des incendies ou des dégâts causés par les parasites jouent également leur rôle. La politique forestière revêt donc une importance supplémentaire pour la protection du climat. Et le reboisement de prairies et de pâturages abandonnés bénéficie ainsi d'un nouvel éclairage.

La forêt n'est pas la seule à fixer le carbone. L'humus du sol peut lui aussi en retenir de grandes quantités, tout comme les haies, les potagers et les bosquets. La protection du climat devient un argument important en faveur de la bonne utilisation de tous ces réservoirs.

Tableau 2 :

Emissions et absorption de CO₂ en Suisse, en 1998	(millions de tonnes)
Emissions de CO ₂ dues aux matières fossiles	44.8
Total des émissions de gaz à effet de serre, méthane et protoxyde d'azote (N ₂ O) compris	53.7
Absorption de CO ₂ par la forêt	- 6.1

Les forêts de conifères sont championnes toutes catégories pour piéger le CO₂. Par hectare, elles stockent 157 tonnes de carbone dans leur biomasse, ce qui correspond à 575 tonnes de CO₂ non émises dans l'atmosphère.

1 mètre cube de bois = 1 tonne de CO₂

Pour produire un mètre cube de bois, un arbre absorbe globalement une tonne de gaz carbonique (CO₂). Il rejettera approximativement 730 kg d'oxygène (O₂) et stockera 270 kg de carbone (C).

3.4.2 Bien utiliser le bois soulage le climat

L'utilisation du bois tiré des forêts n'est pas contraire à l'effet de puits. Après la récolte, le carbone reste lié au bois. La construction de maisons en bois crée de nouveaux réservoirs qui ne libèrent le CO₂ qu'après des années, voire des siècles.

Lorsque le bois est utilisé comme agent énergétique, autrement dit brûlé, le carbone qu'il contient est libéré. Si la forêt dont est issu le combustible est exploitée de manière durable, le chauffage au bois reste neutre côté CO₂. Ce qui implique qu'on n'utilise pas plus de bois qu'il n'en pousse. Le CO₂ libéré au moment de la combustion est réabsorbé constamment par les arbres en

croissance. Ainsi, la forêt et son exploitation ne forment pas une source d'émissions.

L'utilisation du bois de chauffage permet également de faire des économies en combustibles fossiles, et par conséquent de réduire les émissions de CO₂. Raison pour laquelle la forêt peut fournir, par l'utilisation rationnelle du bois, une contribution non négligeable à l'équilibre du bilan de CO₂, lorsque son potentiel de rétention est épuisé.

Bilan global du CO₂
(moyenne des années 1990-1998, en milliards de tonnes par an)

Emissions dues à la combustion de matières fossiles	23.1
Absorption par les océans	- 8.5
Emissions dues aux défrichements et incendies de forêt	5.9
Absorption par les forêts et les sols	- 8.4
Absorption nette par la biosphère	- 2.5
Emissions résiduelles dans l'atmosphère	12.1

Conclusion :

La prolongation des tendances concernant nos émissions de CO₂ pourrait donc conduire à une élévation de température moyenne de la planète de quelques degrés en un siècle.

Quelques degrés de différence sur la température planétaire, c'est l'ordre de grandeur de ce qui sépare le dernier maximum glaciaire, alors qu'il y avait trois kilomètres de glace sur l'Angleterre et la steppe boréale en Suisse, de la période "chaude" actuelle. A la sortie d'un âge glaciaire, ces quelques degrés de température moyenne ont été "gagnés" en 10'000 ans.

L'évolution que nous avons mise en route pourrait conduire à un changement du même ordre en un ou deux siècles, ce qui représenterait un bouleversement que l'on peut estimer difficilement compatible avec un confort de vie important à la surface de la planète, voire avec la survie d'une fraction notable de l'humanité. Pour arrêter d'enrichir l'atmosphère en CO₂, qui est le principal gaz à effet de serre d'origine humaine, il faut diviser les émissions planétaires par 2 au moins.

Chercher à prolonger la croissance de la consommation d'énergie fossile "tant que ça passe" pourrait donc nous amener assez vite dans une zone où "ça ne passe plus", soit pour des raisons de ressources, soit pour des raisons climatiques ; un subtil mélange des deux est bien entendu possible.

S'il est donc impossible de décrire avec précision à quoi ressemblerait un monde qui permettrait de marier, pour la nuit des temps, une humanité de quelques milliards d'individus avec un approvisionnement énergétique significatif, il y a au moins une conclusion pratique à tirer, si nous voulons "durer" un tant soit peu : il convient de "décarboner" assez rapidement l'essentiel de notre consommation d'énergie, ce qui requiert de faire appel, dans des proportions qui ne peuvent relever que du "choix citoyen", à la baisse de la consommation d'énergie, aux énergies renouvelables (sachant que les potentiels sont très variables), à la séquestration des émissions de CO₂, et l'ensemble de tout cela s'entend bien sûr au niveau mondial comme individuel.

Bibliographie

- Jancovici et Le Treut: L'effet de serre, Champs Flammarion.
- Jancovici: L'avenir climatique - Quel temps ferons-nous?, Science ouverte Seuil
- Fritz Gassmann: Effet de serre - Modèles et réalités, Georg éditeur
- Bulletin Electrosuisse 16/2005: Statistique globale suisse de l'énergie 2004
- S. Belakhowsky: Introduction aux combustibles et à la combustion, Technique & Documentation

Pour plus d'informations, consulter les sites:

- www.manicore.com
- www.animenergie.ch
- www.suisseenergie.ch