CO2 – Cycle du Carbone



Fiche détaillée Niveau ★★☆

(A partir de la 2nd)

Introduction

Les origines du CO₂ atmosphérique dépendent de l'échelle de temps que l'on considère. A l'échelle géologique, il y a lieu de considérer l'ensemble des échanges entre toutes les sphères de l'environnement incluant la lithosphère et l'interaction entre carbonates et silicates avec un bouclage par l'activité volcanique qui maintient à long terme la concentration de gaz carbonique dans le réservoir atmosphérique. À cette échelle, le cycle du carbone est également couplé au cycle de l'oxygène. Très sommairement résumé, ce cycle commence avec la dissolution du CO2 dans l'eau de pluie pour former de l'acide carbonique qui interagit avec les carbonates et les silicates dans les rivières et les océans contribuant à une fixation 'nette » de CO2 atmosphérique. Lors de la <u>subduction</u> des plaques océaniques, les <u>réactions « métamorphiques</u> » CaCO₃ + SiO₂

CaSiQ + CO₂ produisent à nouveau du CO₂, libéré ensuite dans l'atmosphère par les volcans. A une échelle de temps plus courte (de l'année au millénaire), le cycle du carbone peut

être considéré comme limité aux échanges de surface, sous forme de gaz carbonique, entre la biosphère océanique et continentale et l'atmosphère. Ces échanges sont contrôlés par les

phénomènes de photosynthèse, respiration et décomposition.

La photosynthèse est le processus bioénergétique qui permet aux plantes en milieu terrestre et algués et au phytoplancton en milieu marin de synthétiser de la matière organique en exploitant la lumière du soleil. Les ingrédients nécessaires sont le dioxyde de carbone de l'air, l'eau et les minéraux contenus dans le milieu. Les végétaux sont dits autotrophes (ou plus exactement photrophes) pour le carbone. Une conséquence importante est la libération de molécules de dioxygèné. A l'inverse les organismes hétérotrophes (toutes espèces animales) assimilent le carbone déjà sous forme organique. Les phénomènes de fixation du carbone sont inhérents au métabolisme des espèces vivantes animales ou végétales qui se distinguent en fait par leur mode d'assimilation. Les organismes, qu'ils soient autotrophes et hétérotrophes, rejettent du carbone sous forme de CO₂ par les phénomènes de respiration cellulaire.

Photosynthèse

Photons_ Gaz carbonique (CO₂) + eau (H₂O) Glucose $(C_6H_{12}O_6)$ + oxygène (O_2) (Énergie lumineuse)

Cette réaction à partir de laquelle la plante tire sa matière organique et assure ainsi sa survie, met bien en évidence l'importance de la lumière et du CO₂.

Respiration:

La respiration cellulaire se passe dans les mitochondries. Il s'agit de la transformation de nutriments obtenus lors de la photosynthèse (glucose) avec production d'énergie nécessaire à la survie de l'organisme. Contrairement à la photosynthèse, cette réaction n'est pas catalysée par l'énergie lumineuse, elle se passe donc de jour comme de nuit.

Gaz carbonique (CO₂) + eau (H₂O) Glucose (C₆H₁₂O₆) + oxygène (O₄\-Décomposition :

Le cycle du carbone dans un milieu donné est bouclé par le phénomène de décomposition de matière organique morte. Il s'agit en fait d'oxydation du carbone organique par des décomposeurs (micro-organismes et bactéries) généralement aérobies, donc agissant en présence d'oxygène ; toutefois certaines étapes de la décomposition peuvent aussi intervenir en l'absence d'oxygène, elles aboutissent alors à la formation de méthane.

À une échelle de temps courte (de l'année au millénaire) qui nous intéresse ici, le cycle du carbone peut être considéré comme limité aux échanges de surface, sous forme de dioxyde de carbone, entre la biosphère (océanique et continentale) et l'atmosphère. Cependant, compte tenu des perturbations apportées au cycle du carbone par les activités humaines, il y a lieu de distinguer le cycle préindustriel du cycle actuel.

II. Cycle préindustriel du carbone

Le stock de carbone dans les principaux réservoirs s'exprime en milliards de tonnes (GT) de carbone et les flux en milliards de tonnes par an (10° tonnes.an⁻¹ ou GT.an⁻¹). Le réservoir océanique est de loin le plus important (38000 GT), suivi de celui de la biosphère continentale (le 2200 GT, soit la somme biosphère terrestre et sols+détritus) et de l'atmosphère (600 GT). Ces réservoirs s'échangent naturellement des quantités importantes de carbone. Par exemple, le renouvellement du dioxyde de carbone de l'air par échange avec l'océan de surface se fait tous les 8 ans en moyenne (∏= Q/F), et tous les 6 ans avec la biosphère continentale. Le carbone dissous (essentiellement sous forme d'ions carbonates et bicarbonates et de CO₂ dissous) est activement transporté par les courants de l'océan de surface vers l'océan profond et vice versa. Une fraction de ce carbone dissous est utilisée par le plancton et transformée en biomasse océanique. Une partie de cette biomasse devient du carbone organique dissous (COD) transporté par les courants, tandis qu'une petite fraction (4 GT.an⁻¹) coule vers l'océan profond sous forme de particules biogéniques. La perte constituée par la sédimentation de ces particules est compensée par les apports des rivières et les pertes nettes de l'océan vers l'atmosphère, puis vers la biosphère continentale.

On suppose qu'avant l'ère industrielle, les flux étaient à l'équilibre et donc que la quantité de carbone dans les réservoirs était constante dans le temps. Ces flux et réservoirs, notamment le réservoir atmosphérique, ont été sérieusement modifiés par l'apport de dioxyde de carbone vers l'atmosphère dû à la combustion des combustibles fossiles, à la déforestation et, plus généralement, à tout changement d'utilisation des sols. Les échanges ne sont plus à l'équilibre et les réservoirs augmentent (pour l'océan et l'atmosphère), ou diminuent (pour la biosphère continentale). C'est ce que l'on appelle le « cycle actuel du carbone ».

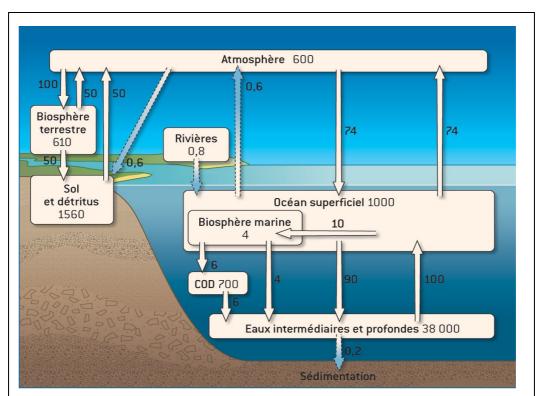


Figure1: Le cycle global préindustriel du carbone Les flèches représentent les flux d'échanges de carbone en milliards de tonnes par an ou GT.an⁻¹ et les réservoirs en milliards de tonnes.

III. Cycle actuel du carbone

La perturbation du cycle naturel du carbone est liée aux émissions de CO₂ par les combustibles fossiles (6,4 GT.an⁻¹) et à la modification de la biosphère continentale (combustion du bois et déstockage de carbone du sol 2 GT.an⁻¹. Si tout le carbone émis par ces sources anthropiques s'accumulait dans l'atmosphère, l'augmentation du CO₂ atmosphérique atteindrait 0,7 % par an ; or, le taux d'augmentation observé actuellement n'est que de 0,4 % par an (1,4 ppm). Donc, seule une fraction du carbone émis en excès s'accumule dans l'atmosphère. À partir des modèles de circulation océanique et de dissolution du CO₂ dans l'eau de l'océan, les océanographes pensent que 40 % de l'excès de CO₂ est dissous chaque année dans l'océan, induisant un déséquilibre du flux net (émission plus forte) de CO₂ entre l'océan et l'atmosphère de l'ordre de 2 GT (C).an⁻¹.

On peut résumer le bilan de la perturbation anthropique du cycle du carbone par l'équation suivante :

Comme aucun modèle océanique ne peut admettre de puits supplémentaire de CO_2 de l'ordre de 5 GT (C).an⁻¹, il y a un puits manquant (puits inconnu) qui pourrait lié à l'augmentation de la production primaire sur les continents sous l'effet de concentrations accrues de CO_2 dans l'air (fertilisation par le CO_2), induisant un stockage accru de carbone dans la biosphère continentale. Cette hypothèse n'est cependant pas démontrée. Elle suppose, par ailleurs, une interaction avec les cycles des autres nutriments (N, P, K).

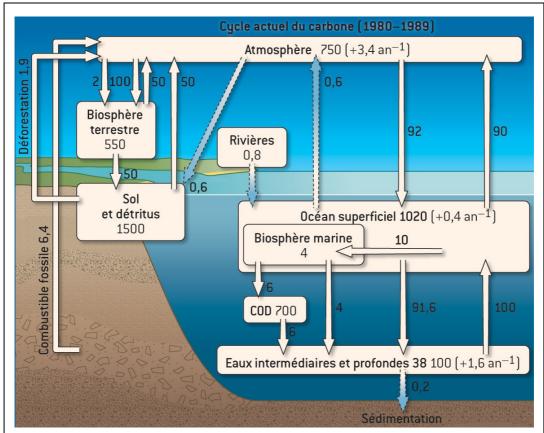
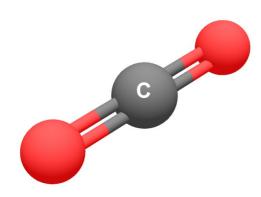


Figure 2: Le cycle global actuel du carbone. Les flèches représentent les flux d'échanges de carbone en milliards de tonnes par an ou GT.an⁻¹ et les réservoirs en milliards de tonnes. Les modifications par rapport au cycle préindustriel correspondent à l'apparition de nouveaux flux (combustibles fossiles et déforestation) et à la modification de la plupart des flux et stocks, ceux-ci ne sont plus en équilibre

IV. Le dioxyde de carbone (CO2)

IV.I. La molécule de CO2



Le dioxyde de carbone, également appelé gaz carbonique, est un composé chimique composé d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène et dont la formule brute est : CO₂.

Cette molécule linéaire a pour formule développée : O=C=O.

Sa masse moléculaire est 44,0095 g mol-1

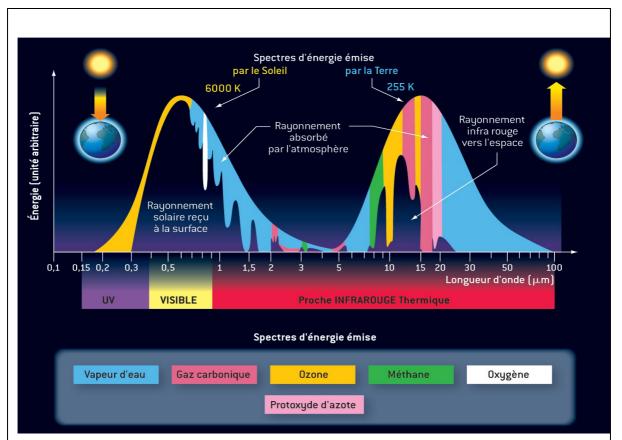


Figure 3 : L'effet de serre : Energie rayonnée par le soleil (à gauche) et par la Terre à droite en fonction de la longueur d'onde. Sur cette figure l'enveloppe externe des courbes représente les spectres normalisés (ou intensité en fonction de la longueur d'onde) de la lumière solaire parvenant sur la Terre pour le premier et émis par la planète pour le second. Le Soleil et la Terre rayonnent dans des gammes de longueur d'onde très différentes du fait de leurs températures de surface respectives, l'un dans le visible autour de 0,5 μm l'autre dans l'infra rouge lointain (ou thermique) autour de 15 μm.

Elle représente également le spectre d'absorption de l'atmosphère terrestre en fonction de la longueur d'onde. Les rayonnements solaires et terrestre sont absorbés par les gaz atmosphériques (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane, ozone, oxygène, protoxyde d'azote). Sur la figure les rayonnements absorbés sont représentés par les surfaces colorées en fonction des bandes d'absorption des différents gaz. C'est ainsi que l'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement UV nous protégeant des coups de soleil, mais il absorbe aussi le rayonnement infra rouge ; c'est donc également un gaz à effet de serre. La vapeur d'eau absorbe l'infra rouge solaire et l'infrarouge thermique au delà de 20 μm. Les autres gaz absorbent l'infrarouge thermique au voisinage du maximum d'émission ce qui explique leur grande efficacité d'absorption. C'est l'absorption du rayonnement infrarouge tellurique par la vapeur d'eau et le CO₂ et également par les autres gaz qui explique l'effet de serre naturel. Les surfaces internes représentent finalement la fraction transmise par l'atmosphère qui reste importante dans le visible et le proche infra rouge. Comme on le voit l'atmosphère est relativement transparente au rayonnement solaire. En revanche la majeure partie du rayonnement infrarouge thermique émis par la Terre est absorbée par l'atmosphère ; la fraction transmise est limitée à la gamme 10-15 µm que l'on appelle la fenêtre atmosphérique. Ces échanges d'énergie définissent le bilan radiatif de la Terre.

Le CO₂ est, avec la vapeur d'eau, comme le montre la figure ci-dessus le principal gaz à effet de serre contribuant à l'effet de serre naturel de la Terre. En ce qui concerne l'effet de serre additionnel (résultant de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre sous l'effet des activités humaines), le CO₂ est le principal contributeur. En effet les activités humaines ne perturbent pas significativement de manière directe la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère. La vapeur d'eau est susceptible d'augmenter par effet de rétroaction suite à l'augmentation de température. Le autres gaz contribuant à l'effet de serre sont le méthane, le protoxyde d'azote, les CFC et l'ozone troposphérique qui n'est pas directement émis mais formé dans l'atmosphère par réaction photochimiques. La figure ci dessous montre que le CO₂ est largement dominant représentant plus des 3/4 (en équivalent CO₂) de la contribution des activités humaines à l'effet de serre additionnel. L'essentiel de la contribution (56,6 %) est due aux combustions de combustibles fossiles, le déboisement et la perte de carbone des sols représentant 17,3 %.

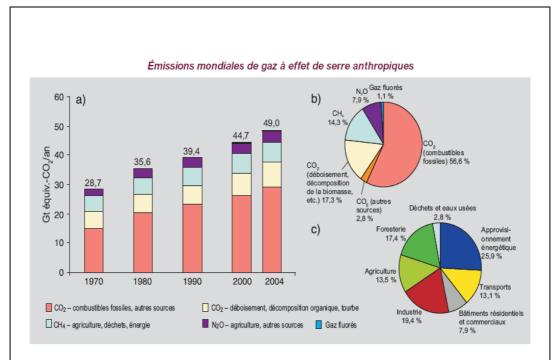


Figure 4. Emissions mondiales de gaz à effet de serre anthropiques recensées dans le rapport IPCC 2007 .

Parmi les sources de CO₂ anthropique, la production d'énergie est la source la plus importante. Elle est largement dominée par l'utilisation de combustibles fossiles dans les centrales thermiques, toutefois toutes les sources d'énergie contribuent à la production de CO₂ de manière plus ou moins directe (Figure 5).

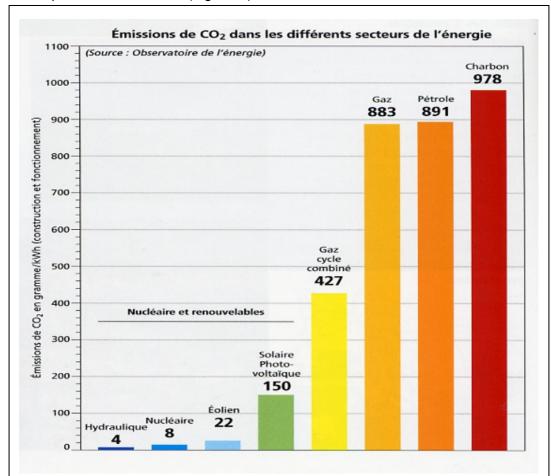


Figure 5. Emissions de CO_2 (en gramme par kW/H) en fonction du mode de production d'énergie. Ces émissions ne sont pas nulles pour les sources d'énergie autre que fossiles car elles tiennent compte des émissions induites par la réalisation de l'installation. (d'après C. Ducroux et P. Jean Baptiste 2004)

I.I. Les variations de la concentration de CO2 dans le passé

La concentration de CO₂ à varié au cours du dernier million d'années en phase avec la température comme le montre les analyse des <u>inclusions d'air dans les glaces polaires</u> de l'Antarctique aussi bien dans le forage réalisé au début des années 80 à la station soviétique de Vostok ou plus récemment à la station du dôme C (forage EPICA).

Cette concentration a évolué de 190 ppv aux périodes les plus froides à 280 ppmv aux périodes les plus chaudes. Depuis la fin de la dernière glaciation elle est restée approximativement constante et les forages réalisés dans les glaces du Groenland ou dans les glaciers indiquent que cette concentration a peu varié entre l'an 1000 et le début du 19 ° siècle (voir figure) indiquant bien que, pendant des périodes stables sur le plan climatique, en l'absence de perturbations, les échanges naturels de CO₂ entre les divers réservoirs sont équilibrés.

En présence de la perturbation générée par les activités humaines depuis le début de l'ère industrielle qui ont accompagnée la formidable croissance de la population mondiale depuis le milieu du 19° siècle, la concentration de CO2 qui était restée stable pendant des millénaires s'est

mise à croitre pour atteindre aujourd'hui 375 ppmv soit une augmentation de plus de 30 % en 150 ans

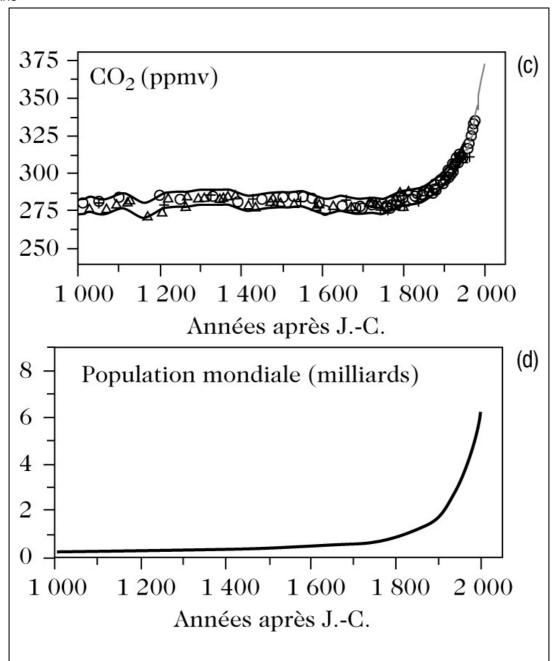


Figure 6. Variations moyennes des concentrations de CO_2 dans les glaces d'après divers jeux de données et variation de la population mondiale depuis l'an $1000 \, \odot \,$ « Physique et Chimie de l'Atmosphère » chapitre 9

L'évolution de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est depuis 1958 confirmée par les mesures directes réalisée à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. L'augmentation est continue depuis 50 ans. Le taux annuel d'augmentation sur les dernières décennies fluctue en raison des évolutions interannuelles des flux naturels mais ce taux se maintient autour de 0, 5% par an

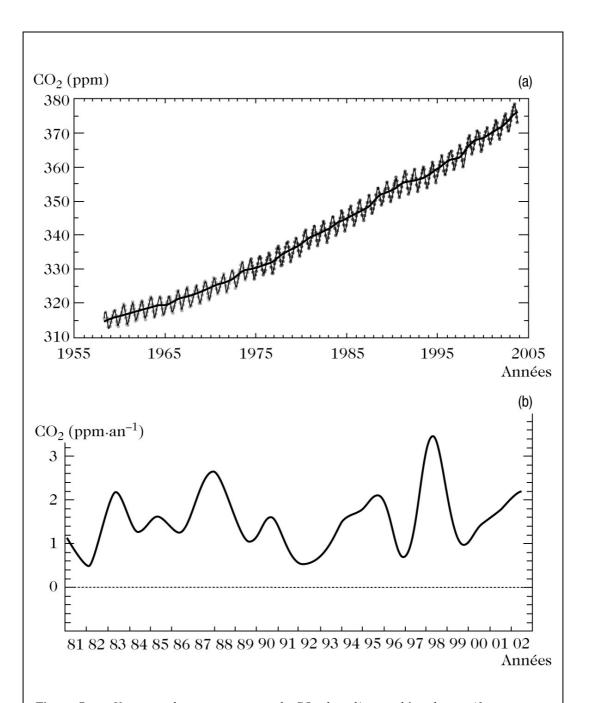


Figure 7. Variation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère depuis 40 ans et taux annuel d'augmentation depuis les années 1980. L'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère est observée depuis le début des années 1960; les premières mesures continues (représentées sur la figure du haut) sur l'Île de Hawaï dans la Pacifique. Les variations annuelles de la concentration moyenne de CO₂ dans l'atmosphère sont modulées par les cycles de la végétation continentale. La tendance moyenne à l'augmentation du CO₂ est perceptible en tout point du globe, elle varie cependant d'une année à l'autre (figure du bas) en raison de la variabilité climatique naturelle qui induit des modifications des échanges naturels de CO₂. Le taux d'augmentation reste cependant toujours positif et stable en moyenne sur les 20 dernières années autour de 1,5 ppm/an.

IV.III. Les autres composés carbonés

Les échanges de carbone entre la biosphère et l'atmosphère ne se limitent pas aux échanges de CO₂. D'autres composés carbonés d'origine biogénique sont émis dans l'atmosphère, notamment par la biosphère continentale. Il s'agit du méthane (CH₄), du monoxyde de carbone (CO) et surtout des hydrocarbures non méthaniques (composés organiques volatiles tels que les alcanes, les alcènes, les hydrocarbures oxygénés). Le méthane est surtout émis par les sols où il résulte de la dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène (marécages forêts inondées). Le CO résulte principalement des combustions déficitaires en oxygène et de l'oxydation des hydrocarbures biogéniques et du méthane. Les sources anthropiques de méthane et de CO sont particulièrement nombreuses (rizières, ruminants domestiques, combustions...etc.). Toutefois l'ensemble des sources (naturelles et anthropiques) ne représentent qu'environ 2 GT (C)/an. Ces composés participent pleinement au cycle biogéochimique du carbone en s'intégrant au cycle du CO₂ après oxydation dans l'atmosphère.