

BG-A-1 Le cycle du carbone

- Quand **Calvin** injecte du CO₂ radioactif dans une suspension de chlorelles et qu'il récupère des glucides radioactifs, il tire parti d'une des étapes du cycle du carbone, ici la photosynthèse, qui fait passer du carbone depuis le réservoir atmosphérique oxydé vers le réservoir réduit de la biomasse, par un processus de conversion de molécules carbonées.
- Comme tous les éléments chimiques, l'atome de carbone n'est pas fabriqué lors de ces réactions, il passe simplement d'une forme moléculaire à une autre, et ces conversions et transferts physiques sans fin conduisent à dessiner un cycle.
- En tant qu'atome majeur des molécules organiques, le carbone a une grande importance dans l'étude biologique des écosystèmes, mais l'importance économique des roches carbonées justifie aussi son étude en sciences de la Terre, d'où le positionnement ici dans les biogéosciences.
- Et bien sûr, comme le CO₂ est un des principaux gaz à effet de serre, l'étude de ce cycle est un incontournable des problématiques autour de la paléoclimatologie et du réchauffement climatique actuel (*mais attention à ne pas confondre cycle du carbone et cycle du CO₂*)
- Objectif : culture scientifique de base autour du cycle du carbone afin de comprendre toutes les problématiques qui gravitent autour de cette notion
- Plan du cours : l'étude d'un cycle de la matière, quel qu'il soit, se fait généralement toujours de la même manière, progressive et logique : 1/ le recensement des réservoirs et des formes moléculaires 2/ la compréhension des échanges entre réservoirs et 3/ une synthèse présentant le cycle. Puis selon l'atome étudié, on développe plus ou moins certaines notions complémentaires. Ce genre de plan peut servir pour les colles, mais pas toujours

Conseils pour apprendre ce genre de cours :

- *tout s'articule sur la connaissance du cycle en tant que schéma légendé, les notions annexes arrivant d'elles-mêmes lorsqu'on se récite le cycle.*
- *d'abord il faut donc avoir son propre cycle à apprendre : anciennement un exercice de TP, mais désormais avec la mise en ligne anticipée du cours, voici ce qu'il faut faire :*
 - lire le cours et recenser au fur et à mesure les principaux réservoirs que l'on place sur sa feuille de la manière la plus pratique et la plus logique possible, avec un choix graphique sobre pour les réservoirs ou bien en les illustrant pour les identifier, à sa convenance personnelle
 - en même temps on reporte les ordres de grandeur des quantités stockées en GtC et les formules chimiques et les noms des formes de stockage
 - et toujours grâce à la lecture du cours on rajoute les flèches des échanges entre réservoirs, des ordres de grandeurs de flux annuels et les noms éventuels des processus de transferts et de conversions des formes carbonées d'un réservoir à l'autre
- *pour s'entraîner à mémoriser le cycle, une fois le cours travaillé : sur une grande feuille de brouillon il faut refaire la même chose et se réciter le cycle, sans le support du cours, de mémoire : les réservoirs, les formes chimiques stockées et les ordres de grandeur, les liaisons entre les réservoirs, des ordres de grandeurs des transferts. Et à la fin vérifier la justesse du schéma et reprendre certaines choses s'il est illisible.*

I/ LES RESERVOIRS CARBONES ET LES FORMES CHIMIQUES ASSOCIEES

Attention, les rapports de jurys insistent tous les ans sur le fait que « les candidats ne connaissent pas les ordres de grandeur des réservoirs et des flux ».

1°/ L'élément carbone → un 1°/ qui serait aussi bien en introduction étant donné l'intitulé du I/

- le carbone se forme dans les étoiles (nucléosynthèse stellaire). Toutes les étoiles fabriquent de l'hélium à partir d'hydrogène. Mais en fin de vie (stade géante rouge), si elles sont suffisamment massives, il y a en plus fabrication d'éléments plus lourds, dont le carbone, et jusqu'au fer. Pour information pour les éléments encore plus lourds, cela se passe au cours de l'explosion en supernova. Les éléments chimiques sont dispersés dans l'espace, en plus ou moins grande abondance relative. Le carbone représente 0,03 à 0,05 % de l'Univers global.
- lors de la formation du système solaire, du carbone se trouvait au sein des poussières stellaires qui se sont agglomérées. On en retrouve dans la Terre globale avec un pourcentage massique de 0,02%, et de 0,1% dans la croûte (estimations variables entre 0,02% et 0,19 %)
- l'élément carbone est présent sous deux formes naturelles : cristalline (C pur : graphite, diamant) et moléculaire ; on négligera les formes cristallines. Le carbone moléculaire se divise généralement en carbone minéral et carbone organique
- l'ordre de grandeur sera le **gigatonne (Gt)** → toutes les estimations en **GtC = gigatonnes de carbone cf. doc.1 et doc.2**

2°/ Le réservoir atmosphérique

- contient majoritairement du carbone oxydé = du dioxyde de carbone, CO₂ ; **840 GtC**
- quantité de CO₂ mesurée en ppm : le ppm est une fraction, c'est « la partie par million » ; selon les cas on peut utiliser des ppm massiques, ou volumiques, ou molaires/moléculaires ; ici c'est un ppm moléculaire qu'on donne, soit le nombre de molécules de CO₂ dans un million de molécules d'air sec ; c'est une mesure qui permet de suivre les variations de CO₂ de manière claire, sans qu'elles soient faussées par les variations de pression, de T° et d'humidité relative (si on prenait une concentration, ce serait rapporté à un volume qui est lui-même influencé par ces trois paramètres)
- le seuil des **420 ppm** a été atteint en pic en mai 2022, valeur à **retenir**, on y est presque en moyenne annuelle ; 1 ppm de CO₂ fait environ 2 GtC, donc 420 → 840 GtC ; taux en augmentation continue mais avec des oscillations sur le graphique (notamment les

oscillations annuelles à cause du cycle de la végétation) ; donc pour voir le taux exact au moment de l'apprentissage du cours c'est ici : <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/index.html> (laboratoire de mesure du Mauna Loa, Hawaï) ; aller voir la courbe c'est intéressant ; pour information, lors de mon premier cours en tant que prof sur le cycle du carbone, au début des années 90, on faisait apprendre 370 ppm aux élèves... et avant la révolution industrielle c'était 280 ppm la référence

- **méthane**, CH₄, à 1,9 ppm ; **10,5 GtC** (1 ppm méthane autour de 5,5 GtC)
- monoxyde de carbone CO, traces d'hydrocarbures et d'autres formes mineures que l'on négligera.
- *cf. doc3 et doc 4 les courbes de référence d'Hawaï*

3°/ Le réservoir biologique

- le carbone = le deuxième matériau constitutif des êtres vivants, le plus abondant en masse après l'oxygène ; 18% du corps humain
- **C présent dans toutes les biomolécules** [glucides, lipides, protides, etc. ; formule globale matière organique : CH₂ON] (rappel : cellulose = la moitié de la biomasse terrestre) ; c'est du carbone **réduit**
- biomasse vivante : **600 GtC** de biomasse aérienne essentiellement végétale et **5 GtC** de biomasse marine (essentiellement le plancton) ; détails *cf. doc 5*
- biomasse morte dans les sols : **1500GtC** ; = molécules organiques à décomposition plus ou moins rapide ; beaucoup de lignine et de cellulose, mais aussi divers composés organiques de l'humus (*cf. cours sur le sol*)

4°/ Le réservoir hydrosphérique

- le carbone océanique est majoritairement minéral ; résultat de la dissolution du CO₂ atmosphérique dans les eaux de surface, brassées par les courants marins
- **trois formes** : hydrogénocarbonates (HCO₃⁻ 93%), carbonates (CO₃⁻, 6%) et dioxyde de carbone dissout (CO₂, 1%) ; abondance conditionnée par le pH neutre de l'eau et les pKa de l'acide carbonique (*cf. cours de chimie*)
- autour de 50 fois le réservoir atmosphérique avec **39 000 GtC** mais pour les échanges rapides seules les eaux superficielles comptent, soit **1000 GtC**

5°/ Le réservoir crustal

- **les roches sédimentaires carbonatées** : les calcaires au sens large (minéraux : calcite, aragonite - CaCO₃ - et dolomite (Ca,Mg)CO₃) et les marbres (calcaires métamorphisés) ; le plus gros réservoir de carbone de notre planète : **50.10⁶ GtC** (pour info. on voit de 30 à 80 comme estimations)
- **la matière organique « fossile » dans les sédiments et les roches carbonées** ; beaucoup de matière organique se retrouve piégée dans les sédiments **10⁶ GtC** mais on peut lire davantage (15 à 20 .10⁶ Gt) ; attention : un fossile de coquillage ou d'ammonite n'est pas de la matière organique, ce n'est qu'une empreinte minéralisée ; on parle ici des hydrocarbures issus d'une décomposition lente des biomolécules ; cette matière organique intermédiaire entre la biomasse et les combustibles fossiles est appelée le **kérogène** ; une petite partie (< 1%) du kérogène évoluera, si les conditions sont bonnes, en véritables roches carbonées : charbon, pétrole, gaz naturel
- **les autres roches, non carbonées ni carbonatées** : réservoir mal connu et mal estimé ; il y a très peu de carbone par roche (exemple granite : 200 ppm) mais ces roches sont très abondantes → peut être **50.10⁶ GtC** aussi
- **les clathrates ou hydrates de méthane** : substance solide ressemblant à de la glace et constituée d'un mélange d'eau et de méthane ; **à la mode dans les médias**, scientifiques ou non, en raison de tentatives d'exploitation comme ressource énergétique considérable et aussi à cause de leur contribution éventuelle à l'augmentation de l'effet de serre en cas de réchauffement climatique dégelant les pergélisols et libérant le méthane gelé ; étymologie clathratus = garni d'une grille (penser à la cage de clathrine de l'endocytose) ; *doc.6* : mince cage de glace emprisonnant du méthane (rapport de quantité de 1 à 160) ; on les trouve :
 - dans les pergélisols : pergélisol = permafrost = sous-sol gelé en permanence des zones proches des pôles (actuellement zones arctiques en raison de la répartition des masses continentales sur Terre) ; épaisseur de plusieurs 100^{aines} de mètres (jusqu'à 1000m) ; la partie superficielle (zone active) peut dégeler l'été sur qq cm à qq dm ; clathrates dans la zone 200-600 m (*doc.7*) ; estimations sur les clathrates pas encore très concordantes : disons **1500 GtC dans les pergélisols** (= 2x le CO₂ atmosphérique !)
 - dans certains sédiments océaniques des marges, dans une zone de 400 à 1000 m où les conditions de T° et de pression sont compatibles avec leur présence (*doc.8* : zone où la courbe de T° passe à gauche de la limite de phase) ; estimation : **500 à 2500 GtC** (attention, les premières estimations étaient à 10000 GtC)

6°/ Le réservoir mantellique

- mal connu ; quelles formes carbonées exactement ? ; quantité sans doute importante en raison de la taille du manteau ; **10.10⁶ à 100.10⁶ GtC**

II/ LES FLUX ENTRE RESERVOIRS : UNE GRANDE DIVERSITE A BASE AUSSI BIOLOGIQUE QUE GEOLOGIQUE ET PHYSISCO-CHIMIQUE *cf. doc 9 et doc 10 pour quelques valeurs chiffrées*

NB vocabulaire : les réservoirs capables d'absorber activement le CO₂ lorsque son taux augmente sont appelés des « puits »

1°/ Les règles générales des flux

- les déplacements de carbone d'un réservoir à un autre sont régis par des processus de **conversions** de formes moléculaires en autres formes, ou par des **transferts** physiques

- flux souvent réversibles, donc le sens du déplacement dépend des concentrations des différentes espèces, et un excès d'un côté entraîne un déplacement de la réaction dans le sens du retour à l'équilibre. Par exemple un excès de CO₂ atmosphérique provoque une augmentation de la quantité de CO₂ dissous dans l'océan. On retrouve la loi d'action des masses et les constantes d'équilibre. A noter que la T° agit sur cette constante d'équilibre.
- même quand les équations ne sont pas réversibles, il y a souvent un phénomène inverse, différent mais qui peut faire évoluer les choses dans l'autre sens
- le réservoir atmosphérique est une zone charnière empruntée par le carbone dans beaucoup d'échanges (mais pas tous), d'où son importance

2°/ Le temps de résidence (ou de renouvellement)

- dans l'analyse d'un flux d'un réservoir à un autre, il faut prendre en compte non seulement la quantité de matière qui transite mais aussi cette quantité par rapport au volume du réservoir.
- quand un réservoir est à l'équilibre – donc flux entrant = flux sortant – on peut calculer **un temps de résidence**, c'est-à-dire le temps que met un réservoir pour que tout le carbone contenu parte et soit remplacé par du carbone venant d'un autre réservoir.
- ce temps t est égal au contenu de carbone du réservoir (= masse M) divisé par le flux entrant ou le flux sortant (=F) : $t = M/F$
- par exemple pour la biosphère : M = environ 600 GtC et les flux entrants et sortants annuels sont de 120 GtC ; d'où $t = 600/120 = 5$ ans (sans tenir compte de la partie qui part dans la nécromasse)
- quand le réservoir n'est pas à l'équilibre, on prend pour le calcul la moyenne entre flux entrant et flux sortant
- **temps de résidence et temps d'élimination : attention à ne pas confondre.** Lorsqu'on étudie les conséquences climatiques de l'augmentation des gaz à effet de serre (voir plus loin dans le cours carbone et en climatologie) on s'intéresse au temps que met un surplus de gaz transféré vers un réservoir – notamment l'atmosphère – pour être évacué par divers processus (par exemple le méthane atmosphérique disparaît car il réagit avec les radicaux hydroxyles pour donner du CO₂). Il convient d'appeler ce temps d'évacuation « temps d'élimination » mais dans beaucoup d'articles il est appelé aussi temps de résidence, d'où des incohérences apparentes entre des textes qui disent que le CO₂ atmosphérique a un temps de résidence de 5 ans (= le vrai temps de résidence avec en plus un abus de langage « carbone = CO₂ » car le CO₂ est la forme prépondérante) et d'autres où on lit que le temps de résidence est de 100 ans (ou plus) et qui parlent eux du temps d'élimination d'un surplus de CO₂
- ces temps de résidence étant clairement ciblés par le programme, cf. fiche de révisions, on va consacrer une page de documents à leur chiffrage à partir de différentes sources *cf. docs 11*
- on parle aussi parfois de temps de réaction qui est le temps mis par un réservoir à atteindre un nouvel équilibre suite à un apport ou à un départ. En première approximation, le temps de réaction d'un réservoir est inversement proportionnel à sa taille.
- les échanges entre réservoirs peuvent absorber et masquer certaines variations → **application au réchauffement climatique actuel** : l'augmentation atmosphérique de CO₂ depuis 1750 jusqu'à 2000 par exemple, soit de 280 ppm à 368 ppm, ne représente que la moitié du CO₂ anthropique relâché en raison de l'augmentation de la fixation dans les puits océaniques (influence de l'augmentation de pression partielle) et biosphériques. Scénario prévisible : jusqu'en 2050 le flux de CO₂ vers le puits océanique resterait stable, deux effets contradictoires se compensant à peu près : l'augmentation de pression partielle atmosphérique de CO₂ qui tend à augmenter la dissolution, alors que l'augmentation de T° induite par l'effet de serre diminue la dissolution ; puis, le CO₂ continuant à augmenter, le puits océanique finirait par baisser fortement d'activité à cause de l'augmentation de T° et en raison d'une stratification des eaux par limitation de la circulation thermo-haline (horizon 2100)

3°/ Un exemple de réservoir aux échanges variés et complexes : le méthane atmosphérique

(un paragraphe créé un peu artificiellement pour approfondir sur le méthane, un élément important du cycle)

a/ quelques repères sur l'élément méthane

- o quelques données chiffrées : 1,9 ppm, **10,5 GtC**, temps de résidence atmosphérique du méthane : 12 ans, production annuelle entre 0,5 et 0,8 Gt de méthane (pour les GtC multiplier les Gt de méthane par 12/16 et comprendre pourquoi) (*cf. doc 4*).
- o **un gaz à effet de serre d'importance majeure** d'où ce développement (cf. plus loin)
- o le cycle du méthane est une sous-partie du cycle du carbone (*cf. doc 12 pour un exemple de cycle de livre mais il faudra s'en construire un pour les colles*).
- o *des valeurs chiffrées dans les docs 12, 13, 14 et 15*

b/ les sources de méthane non biogènes ou indirectement biogènes :

- o les feux de forêts, l'industrie, dégagent du méthane. On distingue les sources anthropiques pyrogéniques (combustion de la biomasse, des biofuels) et les sources thermogéniques (formation et exploitation des combustibles fossiles)
- o du méthane se forme également lors de la transformation de la matière organique fossile, par craquage. Les sédiments riches en matière organique produisent en conditions anaérobies du kérogène, substance carbonée solide intermédiaire entre la matière organique fraîche et les roches carbonées. Si le kérogène est enfoui dans des conditions adéquates, il se réchauffe et subit une pyrolyse qui peut aboutir selon les cas à du gaz – le méthane – et du charbon ou du pétrole (*cf. cours de sédimentologie*). Le méthane soit reste piégé avec les autres roches carbonées, soit s'échappe vers l'atmosphère
- o les réactions de serpentinisation produisent du méthane océanique (par des réactions annexes à celles ciblées dans le cours de géologie de spé sur l'hydrothermalisme)
- o autre source potentielle de méthane : les clathrates ou hydrates de méthane (cf. plus haut) ; une fusion de la glace de méthane est potentiellement une source de méthane ; possible :
 - dans les pergélisols : si fusion ce serait alors du méthane biogène à l'origine (donc indirectement biogène)
 - dans l'océan : soit du méthane indirectement biogène provenant de la décomposition de la MO des sédiments des marges, soit du non biogène provenant des réactions de serpentinisation

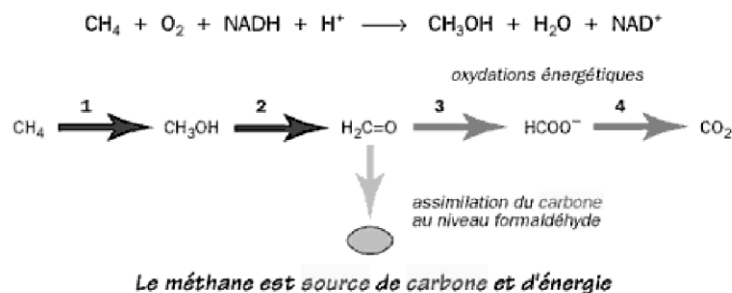
- remarque sur l'émission océanique de méthane : elle est faible, absente de certains schémas-bilans alors que l'océan produit beaucoup de méthane. En fait soit le méthane est pris dans les clathrates, soit il est consommé par des archées méthanotrophes des fonds marins

c/ les sources de méthane directement biogènes (sources biogéniques) :

- le méthane est un déchet du métabolisme de certains microorganismes en conditions anaérobies ; = produit final de la décomposition anoxique de la MO par des archées méthanogènes ; ces microbes sont très répandus dans les sols, les marais, les rizières, les décharges, les lisiers, les sédiments océaniques (pas que dans le rumen). Quand les conditions le permettent ce méthane peut s'accumuler sous forme de clathrates continentaux ou marins
- on trouve aussi ces archées méthanogènes dans la flore intestinale des ruminants, notamment des bovins (cf. cours sur la vache). Ces microorganismes symbiotiques produisent une quantité non négligeable de méthane : par exemple années 2003-2012, 30% des émissions mondiales liées à l'élevage (fumier compris) (*cf. doc 12*) ; 100 à 500 L/jour et /vache, par éructation essentiellement, soit plus de 100 kg par an et par animal
- quelques notions sur les bactéries méthanogènes : diversifiées, mais ont toutes en commun de produire du méthane qui correspond au déchet réducteur s'accumulant en fin de réactions redox, le CO₂ étant l'accepteur d'électrons ; anaérobies strictes considérées comme les éboueurs des milieux anoxiques ; placées en fin de réseau trophique, elles utilisent les déchets carbonés produits par d'autres bactéries, le CO₂ ou divers composés organiques tels que l'acétate :
 - certaines sont autotrophes, H₂ est le donneur d'électrons et CO₂ est à la fois l'accepteur d'e⁻ et la source de matière (incorporation par une autre voie que le cycle de Calvin et aboutissant à l'acétylCoA) : $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. **A retenir** car ce sont les principales méthanogènes du rumen (cf. cours vache et complément éventuel). Elles sont chimiolithotrophes respiratoires anaérobies. Les termites, d'autres phytophages à symbiote développé, sont aussi de grands producteurs de méthane (les termites sont cellulolytiques comme les herbivores, mais en plus ligninolytiques)
 - * : d'autres sont hétérotrophes et effectuent une respiration chimioorganotrophe anaérobie dans laquelle des molécules organiques telles que l'acide formique (HCOOH) ou l'acétate servent de donneur d'électrons et CO₂ est l'accepteur : $\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$
- à noter qu'on a découvert également chez de nombreux êtres vivants des processus de production aérobies de méthane (végétaux, champignons, algues, bactéries) mal connus mais non négligeables (30% des émissions ?)

d/ les sites de consommations de méthane (puits de méthane) :

- destruction atmosphérique par OH⁻ principalement, ou par des formes réactives de l'oxygène ; le méthane est oxydé en CO puis CO₂, on obtient aussi par exemple l'acide formique
- consommation par les méthanotrophes :
 - certaines bactéries consomment le méthane qui sert à la fois de source d'énergie et de source de matière. Ce sont des bactéries méthanotrophes. Elles vivent en aérobie (O₂ accepteur d'électrons) dans des milieux variés proches des sources de méthane biogènes terrestres ou marines. (cf. par exemple le sujet d'entraînement sur documents en ligne qui parle de la symbiose sphaignes-méthanotrophes)
 - (la suite en *) l'oxydation biologique du méthane passe par plusieurs intermédiaires dont le méthanol (cf. ci-dessous) ; une étape clé est la transformation de méthanol en aldéhyde formique (formaldéhyde) par une alcool déshydrogénase particulière (étape n°2) → c'est le formaldéhyde qui servira de source privilégiée de matière en même temps que de source de pouvoir réducteur



Selon le type de méthanotrophe, l'incorporation du formaldéhyde se fait de manière différente ; deux grandes voies connues pour le moment (l'une avec fixation sur le ribulose 5 P et consommation d'ATP aboutissant à un glucide C3P, l'autre par incorporation sur des acides aminés). On aurait pu imaginer un cycle de Calvin à partir du CO₂, et le méthane servant uniquement comme source d'énergie, mais ce n'est pas le cas (mais tous ces organismes sont encore à l'étude comme beaucoup de microorganismes, ça peut évoluer)

Tous les microorganismes capables d'utiliser un C₁ comme source de matière et d'énergie sont des « méthylotrophes », ce sont des eubactéries et quelques levures. Certains sont stricts et beaucoup facultatifs. L'oxydation du méthanol ou de méthyl-amine est assez répandue. Les méthylotrophes qui oxydent le méthane en plus grâce à leur méthane oxygénase (étape n°1) sont les « méthanotrophes ».

Bilan : le méthane représente donc un réservoir créé et détruit de manière biotique et abiotique

4°/ Les échanges de carbone mettant en jeu la biosphère

a/ les échanges de CO₂ entre biosphère continentale et atmosphère

- des échanges de type « conversions »
- appauvrissement de l'atmosphère en CO₂ dû à la biosphère : par la photosynthèse (brute) des eucaryotes et des bactéries, ainsi que par les chimiolithotrophies, donc par tous les autotrophes au carbone ; équations-bilans [...*cf. autres cours, à mobiliser ici...*]

- enrichissement de l'atmosphère en CO₂ par la biosphère : respiration (des végétaux, des animaux et des microorganismes du sol, d'où minéralisation), certaines fermentations (alcooliques) ; équations-bilans... [cf. autres cours, à mobiliser ici...]
 - flux équilibrés de 120 GtC/an, temps de résidence 5 ans dans la biosphère
 - **remarque importante (et à la mode)** : quand on parle d'échanges gazeux entre la biosphère et l'atmosphère on entend souvent des formules répandues mais fausses, notamment à l'occasion des grands incendies en Amazonie. Donc, **attention, la forêt amazonienne n'est pas le « poumon de la planète »** (mais ce n'est pas une raison pour la détruire quand même car il reste d'une part le problème de la biodiversité et d'autre part sa destruction rajoute énormément de CO₂ dans l'atmosphère, ce dont on n'a pas vraiment besoin). En effet, une forêt en équilibre consomme autant de CO₂ par photosynthèse que ce qu'elle en dégage par sa respiration et sa décomposition ⇒ donc **bilan nul**. Une jeune forêt en voie de développement par contre est un puits à CO₂ (temporairement seulement, donc planter des arbres est intéressant pour divers aspects mais ne sauvera pas grand-chose), et une forêt sénescente est une source de CO₂. Et vu l'équation de la photosynthèse, c'est le même raisonnement pour l'O₂ donc notion de « poumon » fausse.
- Pour information, un des sujets d'oraux de biologie à l'ENS est justement « La forêt amazonienne, poumon de la planète ? » et il faut aller lire cette page sur leur site <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/oxygene-Amazonie-poumon-Terre.xml>

b/ les échanges de méthane : cf. ci-dessus

c/ les échanges entre biosphère océanique, CO₂, eau, atmosphère

- mêmes phénomènes que pour la biosphère continentale, également des conversions, mais les échanges se font en deux temps avec l'atmosphère car transit via le réservoir océanique, sous forme de CO₂ dissous et d'hydrogénocarbonates, la forme prépondérante
- temps de résidence de $5/50 = 36,5$ jours

d/ la sédimentation carbonatée biogène (tests, coquilles...) : c'est la biosphère à l'origine mais on le mettra dans la partie suivante (cf. 8°/)

5°/ Les échanges de carbone mettant en jeu les sédiments carbonés

- appauvrissement de l'atmosphère en CO₂ par enfouissement sans décomposition de la matière organique → piégeage du carbone → kérogène et → roches carbonées ; des conversions chimiques ; l'évolution vers les roches carbonées sera d'autant plus poussée que les conditions seront anoxiques ; se fait sur les plateformes continentales et les marges nourries [cf. *sédimentologie + base culturelle charbon-pétrole + complément charbon en ligne*]
 - 1/ les boues planctoniques en milieu anaérobie peuvent donner du pétrole
 - 2/ des dépôts terrigènes riches en produits ligneux en milieu continental : possible charbon, soit dans des bassins côtiers ouverts sur la mer et appelés paraliques (exemple du bassin lorrain, ancien rivage hercynien de mangroves recouvert en anoxie par des molasses hercyniennes avec intercalations organiques) soit dans des bassins lacustres fermés (en demi-grabens, en pull-apart...) appelés limniques, de type bassins du Massif Central (Alès, St Etienne, Decazeville)
- enrichissement de l'atmosphère par oxydation spontanées des roches carbonées revenues en surface ou par leur combustion anthropique

6°/ Les échanges hydrosphère atmosphère

- simple dissolution-dégazage de type loi de Henry ; la solubilité diminue quand la T° augmente ; ici : simples transferts sans conversions chimiques (*doc 16*)
- **flux annuels autour de 90 GtC, temps de résidence de 380 ans** dans les eaux superficielles

7°/ Les transferts océaniques verticaux

- la mort des organismes à tests et coquilles calcaires transfère le carbone vers l'océan profond où la dissolution (notion de CCD) augmente la teneur en CO₂ de l'eau
- il y a aussi des déplacements à l'intérieur du réservoir océanique, entre les eaux superficielles et les eaux profondes, principalement le long de la **circulation thermohaline** (maintenant il faut dire « **circulation méridienne de retournement** ») : le CO₂ suit le trajet de l'eau cf. *cours de sup BG-C-2 et doc 17 pour rappel*)
- **rappel, les grandes lignes de la circulation thermohaline** : en résumé, retenir ce scénario ordonné de manière causale : 1/ l'eau de l'Atlantique nord est plus froide et plus salée (car la prise en glace de la banquise laisse le sel dans l'eau liquide) → 2°/ eau froide et salée donc eau plus dense : elle plonge au sud du Groenland (zone de downwelling) jusqu'au plancher abyssal → 3°/ arrivée au fond : déplacement horizontal vers les zones équatoriales → 4°/ attraction de l'eau de surface chaude vers la zone polaire en remplacement de l'eau qui a plongé, d'où courant de surface → 5°/ remontée de l'eau profonde en deux zones principales d'upwellings (Pacifique nord et Océan Indien) ; la boucle est bouclée, on a une cellule de convection ; la disparition du CO₂ en profondeur est donc temporaire et il réapparaîtra quelques millénaires plus tard au niveau des upwellings (« puits vers le haut »)
- attention, il y a d'autres zones de downwellings et d'upwellings que celles de la circulation thermohaline. Ne pas mélanger par exemple avec les upwellings de la façade ouest des continents où l'eau chaude de surface chassée par les vents d'est est remplacée par des remontées d'eau froide riche en sels minéraux, d'où abondance de plancton et de poissons et zone de pêche, mais pas de coraux car trop froid (ex : côte marocaine et mauritanienne, côte chilienne)
- remarque : modifications possibles et donc conséquences climatiques possibles :
 - une modification de la circulation thermohaline peut modifier les échanges de CO₂ atmosphère-océan et donc le climat
 - une modification du climat peut perturber la circulation thermohaline et donc les échanges de CO₂

8°/ Les échanges mettant en jeu la croûte

- Des mélanges entre des transferts et des conversions.
- **Attention très à la mode : les équations qui suivent et leurs conséquences globales sont centrales dans les questions et exercices de concours, très appréciées à l'ENS mais aussi à l'Agro et à G2E, elles doivent être parfaitement connues**

a/ les échanges avec le réservoir des carbonates

- l'incontournable équation du cours de sédimentologie : $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 = 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$; à savoir faire déplacer d'un côté ou de l'autre selon la situation
- la précipitation des carbonates peut être purement chimique ou biogène (cf. sédimentologie)
- un enrichissement de l'atmosphère en CO_2 déplace l'équilibre dans le sens de la dissolution ; les eaux chargées en CO_2 et l'acide carbonique attaquent les carbonates (principe de la réaction à l'acide des calcaires ; penser au relief karstique) :
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ et $\text{H}^+ + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$ d'où l'équation complète ci-dessus quand on fait le bilan des deux équations précédentes
- remarque : les carbonates peuvent restituer leur carbone dans des phénomènes géologiques autres que la dissolution :
 - métamorphisme dans les zones de subduction ou de collision : la réaction se fait avec la silice, quand P et T augmentent
 $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaSiO}_3$ (pyroxène calcique) + CO_2
c'est l'occasion de réviser les silicates de type pyroxènes : ce sont des chaînes simples (inosilicates) → petit schéma et on voit que le motif de base est SiO_3^{2-} (ou $\text{Si}_2\text{O}_6^{4-}$) donc complété par deux charges + ; toutes sortes de cations peuvent venir ; en fait la formule ci-dessus avec seulement du calcium est simplifiée et n'existe pas ; trois groupes de pyroxènes : les orthopyroxènes (OPx) = $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$, les clinopyroxènes (CPx) avec Fe, Mg, Ca (exemple : augite, pyroxène banal des gabbros et basaltes) et les Cpx alcalins dont deux à connaître : la jadéite $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ et l'omphacite sorte de variante de jadéite trouvée aussi dans les éclogites, intermédiaire entre augite et jadéite
 - restitution via la partie mantellique du cycle : cf. plus loin
- la contribution des êtres vivants :
 - par les sécrétions acides des racines, par les dégagements de CO_2 , les êtres vivants contribuent à acidifier le milieu et donc à la dissolution des carbonates
 - par la fabrication des tests et coquilles carbonatées, les êtres vivants facilitent des dégagements de CO_2 . Chez les coraux par exemple, ce CO_2 est consommé par les algues symbiotiques et stockés brièvement jusqu'à la mort de l'algue. Et en même temps la photosynthèse de l'algue facilite la précipitation du squelette du corail (toujours les déplacements d'équilibres)
- **un bilan net nul à une échelle de temps brève** : de l'échelle humaine au million d'années, l'érosion continentale consommatrice de CO_2 est équilibrée par la sédimentation une fois arrivé en mer qui dégage du CO_2 dans les mêmes proportions. Mais il y a eu une accumulation progressive de roches carbonatées à une échelle de temps plus longue qui a peu à peu fait baisser le taux atmosphérique de CO_2 d'un facteur 100000 à peu près, et c'est à cause de l'altération des silicates, cf. paragraphe suivant
- temps de résidence dans le réservoir carbonaté : si on prend une érosion de 0,5 Gt/an : $t = 50 \cdot 10^6 / 0,5 = 100 \cdot 10^6$ années, mais des estimations vont jusqu'à $300 \cdot 10^6$ années

b/ les échanges avec les roches silicatées

- la logique de ce qui suit est qu'une équation d'altération de silicates implique des échanges carbonés, dont on ne fait le bilan qu'une fois seulement que les produits d'altération sont arrivés en mer, car l'équation classique de précipitation-dissolution se surajoute à ce moment là
- 3 équations d'altération minéralogique à connaître (en domaine continental) qui libèrent de HCO_3^- (et de la silice dissoute plus des cations) ; la roche peut être un basalte ou un gabbro par exemple ; pour deux d'entre elles, on part de formules simplifiées de pyroxènes calciques ou magnésiens, pour la troisième d'un plagioclase, ici de l'anorthite le pôle calcique, en milieu suffisamment chaud (plagioclase : une autre formule à connaître et à savoir retrouver)
 - Pyroxène calcique : $\text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Si(OH)}_4$ (silice dissoute) + Ca^{2+}
 - Pyroxène magnésien : $\text{MgSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Si(OH)}_4$ (silice dissoute) + Mg^{2+}
 - Plagioclase (anorthite) : $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \frac{1}{2}\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8 + \text{Ca}^{2+}$

Ces équations se rajoutent à celles de l'orthose dans le cours de sédimentologie, à apprendre)
(Ces mêmes équations s'appliquent dans le cadre d'une altération hydrothermale océanique, cf. cours océan)
- arrivés en mer, les produits d'altération précipitent selon l'équation classique, et produisent du CO_2 .
- **mais, le bilan de :**
 $1^\circ / \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 = 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}^{2+}$ et $2^\circ / \text{CaSiO}_3 + 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCO}_3^- + \text{Si(OH)}_4$ (silice dissoute) + Ca^{2+}
aboutit à la consommation d'un CO_2 : $2\text{H}_2\text{O} + \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Si(OH)}_4$ (silice dissoute) + CaCO_3
→ donc **l'altération des silicates est consommatrice de CO_2** (0,1 Gt/an) ; conséquence : en période où beaucoup de continents sont émergés et donc soumis à l'altération, le climat refroidit ; cf. lien au climat plus loin

9°/ Les échanges mettant en jeu le manteau

- dégazage par les éruptions volcaniques : 0,1 GtC/an qui s'équilibre avec la disparition de carbonates par subduction dans le manteau
- temps de résidence : $t = 10 \cdot 10^6$ à $100 \cdot 10^6 / 0,1$ soit très long

10°/ Les échanges anthropiques → voir le V/ dédié à cet aspect

- combustibles fossiles + cimenteries : 8 GtC/an (dont 0,5 pour les cimenteries ; la fabrication du ciment à partir de calcaire dégage du CO_2 et beaucoup)
- déforestation : 2 GtC/an (combustion et surtout décomposition des déchets organiques)

III/ LE CYCLE

La mise en illustration de ce qui précède donne un cycle global pouvant être divisé en sous-parties (*attention pour les colles*) en fonction des temps de résidence et des enveloppes terrestres concernées :

- le **cycle court biologique** : très rapide mais avec une branche lente vers le cycle long géologique : l'enfouissement sans décomposition de la matière organique, puits de CO₂ ; *doc 18*
- le **cycle long géologique** : crustal et mantellique *doc 19*
- le **cycle complet** : un exemple *doc 20* mais il faut une **version récitable** → *voir la correction du TP cycle de carbone*

IV/ LE CYCLE DU CARBONE : UN CYCLE PARMIS D'AUTRES CYCLES

- la circulation des atomes de carbone de réservoir en réservoir se faisant pas des molécules plus ou moins hétérogènes au niveau de leurs atomes constitutifs, **le cycle du carbone ne peut pas, d'emblée, être indépendant des autres cycles, il y a donc des couplages**.
- certains sont **directs** : par exemple quand un hétérotrophe absorbe de la matière organique comme source de carbone réduit, il absorbe également de la matière azotée organique réduite comme source d'azote, d'où un couplage carbone/azote. Et d'ailleurs un couplage en même temps avec le cycle de l'oxygène, du soufre (aa cystéine par exemple), du phosphore. De manière générale il suffit de passer en revue les types trophiques et on verra toutes ces interactions, un autre exemple une chimiolithotrophie aérobie de type nitrification impacte directement le cycle de l'azote, de même une respiration anaérobie telle que celle d'E.coli
- d'autres plus indirects : par exemple l'assimilation de l'azote par les végétaux (cycle de l'azote) nécessite de l'énergie et des transporteurs réduits qui arrivent en amont de leur autotrophie au carbone et de leur récupération de CO₂ (cycle du carbone)
- le programme cible comme couplage la décomposition de la matière organique qui sera vue dans le chapitre sur le cycle de l'azote et dans celui sur le sol. On ajoutera un texte un peu plus culturel sur le rôle du cycle long du CO₂ dans l'accumulation du dioxygène terrestre, qui permettra de retracer rapidement le déroulement probable de l'apparition de la vie.

1°/ Décomposition de la matière organique et couplage cycle de l'azote / cycle du carbone → *voir le chapitre sur le cycle de l'azote et le chapitre sur le sol*

2°/ Diversité des types trophiques et couplages anaboliques et cataboliques entre molécules azotées et carbonées → *voir chapitre sur le cycle de l'azote*

3°/ Interactions cycle du carbone / cycle de l'oxygène : l'apparition et le maintien du dioxygène gazeux sur Terre

Paragraphe un peu culturel, on va réduire la police de caractères. On peut raccrocher ce paragraphe au cours de sup BGC-1 sur les caractéristiques de l'atmosphère, et au cours de sédimentologie, voire à d'autres portions de programme. Retenir les grandes lignes du scénario pour tout le monde, et à apprendre en détails pour l'ENS.

- c'est ici la notion classique liée à l'apparition du dioxygène terrestre ; les étapes du raisonnement et le scénario associé sont rappelés ci-dessous tout en développant un peu pour un complément culturel qui peut servir, notamment sur **l'apparition de la vie** (obligatoire en *)
 - **molécules prébiotiques et apparition de la vie**
 - le contexte, en lien avec le cours de géologie sur la formation de la Terre (dans le cours de sup sur la chaleur interne et son origine) : une Terre primordiale en fusion suite à l'accrétion puis au bombardement météoritique → évaporation des éléments volatils, mais l'oxygène reste combiné dans les silicates → une atmosphère « primordiale » composée de vapeur d'eau (en provenance de l'eau d'hydratation des minéraux), de CH₄, CO₂, CO, NH₃ et H₂S. Puis refroidissement de la Terre en dessous de 100°C et condensation massive de la vapeur d'eau → hydrosphère primitive (océan primitif) et l'atmosphère devient « primitive » = la précédente moins la plus grande partie de la vapeur d'eau.
 - dans cette hydrosphère se retrouvent alors les premières molécules organiques simples : acides aminés, bases azotées... Leur apparition fait appel à deux hypothèses : 1/ La soupe primordiale : la matière prébiotique aurait été engendrée spontanément par évolution chimique dans un environnement énergétique (bombardement par les rayonnements solaires + chaleur initiale), riche en matières organiques et dépourvu d'oxygène libre donc non oxydant mais réducteur. Expériences pas franchement concluantes après des années d'essais en laboratoire, mais hypothèse pas encore abandonnée. 2/ La panspermie : arrivée sur Terre de certains monomères d'origine extraterrestre par ensemencement grâce à des chutes de météorites. D'une part la chimie organique est particulièrement active dans les nuages de gaz et de poussière interstellaire, et d'autre part, les météorites possèdent fréquemment des molécules riches en carbone, principalement les chondrites carbonées qui renferment des composés organiques (plus de 70 acides aminés présents dans la biosphère y ont été retrouvés)
 - polymérisation des molécules organiques primitives et construction des premiers polymères complexes autoreproductibles : non développé, scénario encore très hypothétique [quels catalyseurs ? les argiles ? des complexes ligands-métaux ? ...]
 - + quelles macromolécules en premier ? ADN ou protéines ? cf. discussion dans le cours de phylogénèse et notion du « monde à ARN »
 - + la formation des membranes (liposomes, bicouche), premières cellules et premier métabolisme énergétique

Bref : la vie est apparue, il y a 3,9 à 4 Ga

- la succession chronologique des métabolismes (un scénario possible) : 1/ d'abord utilisation de l'ATP naturellement présent dans la soupe organique originelle 2/ puis la première crise d'énergie après épuisement de l'ATP, et l'apparition de la fermentation : l'ATP externe s'épuise, le vivant acquiert la possibilité de recyclage et de fabriquer l'ATP lui-même à partir de l'ADP, mais apport d'énergie nécessaire → glycolyse (glucose = molécule abondante dans le milieu primitif) ; en l'absence d'oxygène, la glycolyse est incluse dans une fermentation 3/ la deuxième crise de l'énergie et l'apparition de la photosynthèse anoxygénique et de la chimiolithotrophie anaérobie : les ressources en glucides dans l'environnement s'épuisent à leur tour → certaines cellules deviennent capables de les fabriquer elles-mêmes soit par chimiosynthèse autotrophe (chimiolithotrophie de type respiration anaérobie), soit par photosynthèse, initialement bactérienne à partir de H₂S donneur d'électrons 4/ photosynthèse oxygénique : formation de nouveaux pigments chlorophylliens capables de réaliser une

photosynthèse cyanobactérienne, libératrice de dioxygène (donneur d'électrons = eau) ; des premières traces d'oxydation que l'on suppose due à de l'O₂ photosynthétique existent dès 3,8 Ga 5/ passage de l'anaérobiose à l'aérobiose : le dioxygène s'accumule finalement (explication plus loin) et des processus aérobies l'utilisent comme accepteur d'électrons, d'où un double avantage car en même temps cela permet de neutraliser ce poison chimique oxydant qu'est le dioxygène

Bref, finalement la photosynthèse oxygénique a existé, et la respiration aussi (remarque : pour la suite de l'apparition de la vie, cf. cours de phylogénèse de spé, endosymbiose...)

■ **pourquoi le dioxygène s'est-il accumulé sur Terre ?**

- a priori il n'aurait pas dû : la matière organique vivante produite par la photosynthèse oxygénique finit toujours pas mourir et se décomposer ⇒ décomposition de la matière organique par la respiration par des décomposeurs ⇒ les équations-bilans de la photosynthèse et de la respiration sont exactement inversées donc au final le bilan en O₂ est nul, celui qui apparaît par photosynthèse disparaît par respiration (voir la discussion sur « la forêt, poumon de la planète », même idée)
- intervention du cycle long du CO₂ : c'est l'enfouissement d'une partie du carbone organique en compagnie des sédiments, dans la géosphère qui a dévié ce carbone vers le cycle à long terme et l'a soustrait à la décomposition biologique → le bilan n'est plus équilibré, du dioxygène peut apparaître dans l'océan primitif (vie exclusivement marine à l'époque, puis dans l'atmosphère)

■ **du dioxygène océanique dissout au dioxygène atmosphérique gazeux**

- une observation, les gisements de fer rubanés : ce sont d'immenses gisements de fer ferrique - donc oxydé - les plus importants sur Terre, et ces couches (marines) sont datées entre 2,5 et 1,8 Ga. Des sédiments de fer ferrique déposés dans la mer sous la forme de couches riches en fer alternant avec des couches siliceuses, or le fer réduit (Fe²⁺) se dissout dans l'eau de mer, tandis que l'état oxydé (Fe³⁺) précipite. Donc l'océan était alors abondamment pourvu en O₂
- scénario : d'abord l'O₂ reste piégé dans les sédiments ferriques sous forme d'hydroxydes (Fe(OH)₃ par exemple), puis une fois le fer ferreux épuisé, vers la fin de ce processus, il y a 800 Ma, il passe dans l'air, la concentration de l'oxygène dans l'atmosphère augmente peu à peu et celle-ci est devenue oxydante.

donc la production primaire basée sur la photosynthèse oxygénique a conditionné l'apparition d'O₂, et l'existence de carbone fossile a permis le maintien du dioxygène

V/ L'INFLUENCE DE L'HOMME SUR LE CYCLE DU CARBONE

Le cours sur le cycle du carbone va servir de base à une réflexion autour des climats actuels, passée et futur dans un chapitre de climatologie, avec bien sûr les problèmes de réchauffement climatique. D'où cette partie imposée sur l'influence de l'homme.

1°/ Homme et cycle du carbone : approche qualitative

- en passant en revue chaque étape du cycle il est facile d'en trouver pour lesquelles l'être humain participe activement
- déjà les 8 milliards d'individus appartiennent au réservoir de la biomasse, respirent, consomment de la MO, rejettent des déchets... (vous pouvez estimer la masse de l'humanité en GtC, ce n'est pas beaucoup en fait)
- les agrosystèmes créés et gérés par l'homme, et les animaux d'élevage se positionnent aussi dans le cycle (65 milliards d'animaux d'élevage terrestres tués en 2014 selon la FAO, dont 62 milliards de poulets ; beaucoup plus si on inclut les poissons)
- la fabrication du ciment, par combustion de calcaire (80%) et d'argile (20%), libère du CO₂, d'une part par la décarbonatation du CaCO₃ en CaO et CO₂, et d'autre part par le combustible du four. En moyenne pour fabriquer une tonne de ciment on produit 800 kg de CO₂ (2/3 pour la décarbonatation et un tiers pour le combustible) [fabrication du ciment chimiquement complexe et HP en SVT, retenir qu'une des équations initiales est CaCO₃ → CaO (chaux vive) + CO₂]
- la combustion des sources d'énergies fossiles, pour produire de l'électricité, pour les transports, pour l'industrie, etc. libère du CO₂
- la déforestation par brûlage libère du CO₂
- et on a vu plus haut les sources humaines de méthane (*docs 12, 14, 15*), en recopier la liste ici : ...
- on peut ajouter à partir des conséquences climatiques des émissions anthropiques, la mise en marche des diverses rétroactions négatives et positives, qui seront vues en climatologie, et qui vont modifier les flux en retour : par exemple le réchauffement de l'océan qui augmente le dégazage, etc...
- ce sont bien entendu les libérations de gaz carbonés à effet de serre qui vont nous intéresser plus particulièrement et qui seront quantifiées dans le paragraphe suivant

2°/ Homme, cycle du carbone et gaz à effet de serre : approche quantitative

a/ Quelques graphiques de mise en évidence de l'évolution des émissions

- les mesures proviennent depuis 1958 de la station de mesure du Mauna Loa à Hawaï ; pour les périodes plus anciennes : les microbulles d'air dans les carottes de glace de type Vostok (cf. cours climatologie).
- pour tous les graphiques des documents 21 à 23 bien faire attention aux échelles, notamment horizontales
- *doc 21* : pour commencer, on retourne voir les graphiques fondamentaux spectaculaires autour de l'influence de l'activité humaine, avec une corrélation qui laisse peu de doute sur la causalité... On a mis deux fois la même courbe sur la population car celle du dessous comprend des légendes que l'on arrive à lire en zoomant. On voit bien pour les gaz les oscillations des glaciations du quaternaire (cf. climatologie) et l'originalité des taux actuels depuis 800000 ans.
- *doc 22* : le cas du CO₂ (avec le rappel sur l'explication des oscillations annuelles de la courbe d'Hawaï). Les valeurs ont été commentées en début de polycopié.
- *doc 23* : le cas du méthane. Là aussi les valeurs ont été déjà commentées plus haut

b/ Quantification des émissions anthropiques

- le cas particulier du ciment : la fabrication du ciment représente 8% des émissions mondiales de CO₂, soit autour de 3,3 GtCO₂/an (vous pouvez faire le calcul en GtC : ...). D'où de nombreux projets et tentatives actuellement de nouveaux procédés de fabrication du ciment qui limiteraient les émissions de CO₂.
- pour le reste, voir les documents : [24](#) (répartitions au sein des industries), [25](#) (pour les combustibles fossiles + les différences entre pays), [26](#) (bilan chiffré général), [27](#) (bilan chiffré CO₂) et [28](#) (bilan chiffré méthane)

c/ Emissions anthropiques et intervention des puits

- comme dit en début de cours, les puits naturels à CO₂ et à méthane ont limité pour le moment l'ampleur de l'accumulation atmosphérique des deux gaz à effet de serre ; on retient la valeur d'en gros 50% de réabsorption. Reste à voir leur efficacité dans le futur (suite en climatologie)
- [doc 26, 27 et 28](#) pour les bilans chiffrés sources/puits

CONCLUSION

Un cycle complexe, des réservoirs interconnectés, un réservoir pour lequel l'homme restitue instantanément à l'échelle géologique une énorme masse de carbone qui avait mis des millions d'années à s'accumuler (les roches carbonées), et d'autres activités humaines perturbatrices, deux acteurs du cycle qui sont des gaz à effet de serre, d'où les conséquences climatiques importantes qu'on s'efforce de modéliser et de prévoir, ce qui passe par la connaissance la plus fine possible de ce cycle

→ suite logique : voir le cours de climatologie (*un autre polycopié...*)

Enfin, on peut noter concernant la participation des êtres vivants que comme dans tout cycle de la matière (idem pour l'azote), des mécanismes évolutifs sous-jacents interviennent : l'existence de recyclages liés à des métabolismes biologiques qui bouclent le cycle et empêchent les points d'accumulation est liée à la sélection naturelle qui favorise l'émergence de métabolismes utilisant des produits accumulés par d'autres espèces ou de processus physico-chimiques.