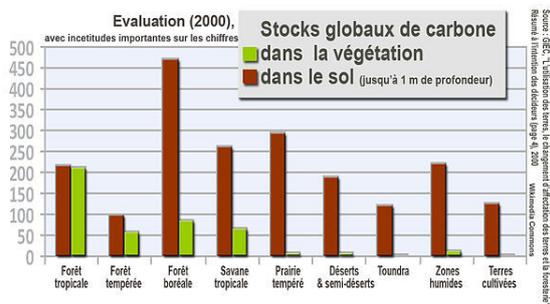


Puits de carbone

☞ Pour les articles homonymes, voir Puits.
Au sens large, un **puits de carbone** ou **puits CO₂** est



Le bois, mais aussi le sol et une partie de la nécromasse végétale, animale, fongique et microbienne des forêts tempérées constituent le puits de carbone le plus important pour les terres émergées.



De manière générale, les sols, plus encore que les végétaux (même en forêt) sont les premiers puits de carbone, tant qu'ils ne sont pas surexploités, érodés ou dégradés.

un réservoir, naturel ou artificiel, de carbone qui absorbe le carbone de l'atmosphère et donc contribue à diminuer la quantité de CO₂ atmosphérique, et en conséquence, le réchauffement de la planète (toutefois cette « conséquence » est une hypothèse non démontrée à ce jour, les puits de carbone étant gros émetteurs de vapeur d'eau : voir gaz à effet de serre). La taille de ces réservoirs augmente constamment, à l'inverse d'une source de carbone. Les principaux puits étaient les processus biologiques de production de charbon, pétrole, gaz naturels, hydrates de méthane et roches calcaires. Ce sont aujourd'hui les océans, les sols (humus, tourbière) et certains milieux végétalistes (forêt en formation).

La séquestration du carbone (ou piégeage, ou emprisonnement du carbone) désigne les processus extrayant le car-



Les récifs coralliens, et certains planctons produisent le carbonate de calcium qui constitue le principal puits de carbone océanique et planétaire.

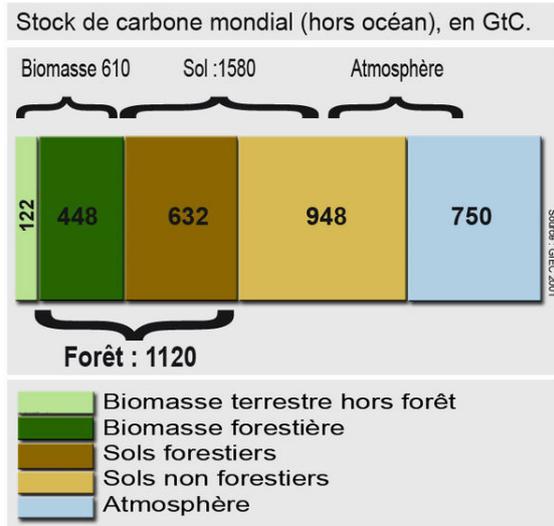
bone ou le CO₂ de l'atmosphère terrestre et le stockant dans un puits de carbone.

La photosynthèse est la base du mécanisme naturel de séquestration du carbone. Les bactéries photosynthétiques, les plantes et la chaîne alimentaire ainsi que la nécromasse qui en dépendent sont considérées comme des puits de carbone pour la partie « piégée » du carbone. En France, la loi Grenelle II prévoit^[1] qu'un rapport du Gouvernement au Parlement portera sur « l'évaluation des puits de carbone retenu par les massifs forestiers » et leur « possible valorisation financière pour les territoires » (art 83).

1 Puits naturels

1.1 Forêts

L'écosystème forestier (et en particulier le système arbre/sol) est après le plancton océanique et avec les tourbières et les prairies, le principal puits de carbone naturel planétaire, essentiel au cycle du carbone. Il accumule d'énormes quantités de carbone dans le bois, les racines, le sol et l'écosystème via la photosynthèse. L'ONU/FAO estime que « l'expansion des plantations d'arbres pourrait compenser « 15 % des émissions de carbone des combustibles fossiles » dans la première moitié du XXI^e siècle sous réserve qu'elles ne le relarguent pas prématurément^[3], et qu'on ait pas surestimé les surfaces enforestées et leur capacité de stockage^[3] et qu'il



Stock de carbone dans le monde (hors océans), selon le GIEC (2001)^[2].

ne s'agisse pas que de plantation d'essences à croissance rapide^[3].

En effet, les plantes absorbent le CO₂ de l'atmosphère, stockant une partie du carbone prélevée et rejetant de l'oxygène dans l'atmosphère. Chez les arbres, les essences pionnières, à croissance rapide (ex : Peuplier, saule ou bouleau en zone tempérée, Bois-canon (creux, à la manière du bambou) en zone tropicale), n'absorbent généralement que peu de carbone et le relarguent vite et facilement. Au contraire, les bois durs et denses en contiennent beaucoup plus, et pour le plus longtemps, mais ils croissent généralement bien plus lentement (siècles à millénaires pour les « très gros bois »). À maturité, l'absorption est moindre, mais le **carbone représente 20 % de leur poids** (en moyenne, et jusqu'à 50 % et plus pour des bois denses tropicaux).

Quand l'arbre meurt, il est décomposé par des communautés saproxylophages (bactéries, champignons et invertébrés) qui recyclent son carbone sous forme de biomasse, nécromasse (*cadavres, excréments et excréments de ces organismes*) et sous forme de gaz (CO₂, méthane, libérés dans l'atmosphère ou l'eau). La forêt et d'autres écosystèmes continueront à stocker ou recycler ce carbone via une **régénération** naturelle. Toutes les forêts tempérées (hors incendies et exploitation) accumulent le carbone. Une grande partie des forêts tropicales (hors forêts tourbeuses) sont réputées à l'équilibre (source=puits), et les forêts boréales jouent un rôle plus complexe (plus sensibles aux défoliations et au feu).

Il arrive localement que les arbres morts, roseaux et plantes des marais se décomposent lentement et imparfaitement, en conditions anaérobies, sous la surface du marais, produisant des tourbes. Le mécanisme est suffisamment lent pour que, dans la plupart des cas, le marais grandisse assez vite et permette de fixer plus de carbone atmosphérique que ce qui est libéré par la décomposi-

tion. Un quart du carbone absorbé par les forêts l'est par les plantes et le sol^[4].

Pour l'ONU, la FAO, pour ses statistiques et inventaires forestiers, distingue^[5] quatre différents stocks de carbone :

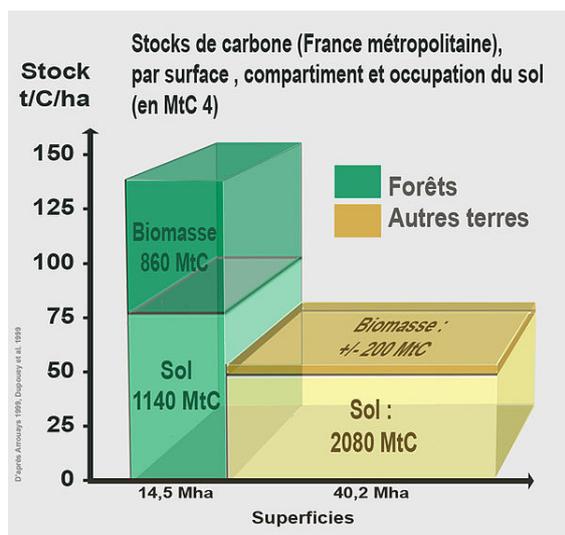
- la **biomasse aérienne** ; « Carbone présent dans toute la biomasse vivante au-dessus du sol, y compris les tiges, les souches, les branches, l'écorce, les graines et le feuillage »^[5] ;
- la **biomasse souterraine** ; « Carbone présent dans toute la biomasse de racines vivantes. Les radicelles de moins de deux mm de diamètre sont exclues car il est souvent difficile de les distinguer empiriquement de la matière organique du sol ou de la litière »^[5] ;
- le **carbone du bois mort** ; de la nécromasse ligneuse - hors de la litière - « soit sur pied, soit gisant au sol, soit dans le sol. Le bois mort comprend le bois gisant à la surface, les racines mortes et les souches dont le diamètre est supérieur ou égal à dix cm ou tout autre diamètre utilisé par le pays »^[5] ;
- le **carbone de la litière** ; « Carbone présent dans toute la biomasse non vivante dont le diamètre est inférieur au diamètre minimal pour le bois mort (p. ex. dix cm), gisant à différents stades de décomposition au-dessus du sol minéral ou organique »^[5] ;
- le **carbone dans le sol** ; « Carbone organique présent dans les sols minéraux et organiques (y compris les tourbières) jusqu'à une profondeur spécifique indiquée par le pays et appliquée de façon cohérente à travers toutes les séries chronologiques »^[5].

Remarque : dans un contexte climatique incertain, certaines forêts plus vulnérables pourraient parfois devenir des « sources » de CO₂ (le contraire d'un puits de carbone), notamment en cas d'incendie, ou provisoirement après les grands chablis couchés par de fortes tempêtes ou après les grandes coupes rases. Certaines techniques de génie écologique (BRF, conservation de gros bois-mort, réintroduction du castor, restauration de zones humides et tourbières, etc.) peuvent contribuer à augmenter la **résilience écologique** de certaines forêts (Europe, Canada, Amérique du Nord, etc.).

Une étude publiée par des chercheurs de l'Université de Brême dans *Atmospheric Chemistry and Physics* début janvier 2015 à partir de données satellitaires estime que les forêts européennes extrairaient plus de deux fois plus de dioxyde de carbone qu'on ne le pensait jusqu'ici^[6]

1.1.1 Forêt française, stock et puits de carbone

Dans le monde la forêt métropolitaine française compte peu en termes de stock de carbone, mais à l'échelle du



Stocks de carbone en France métropolitaine, par surface, compartiment et type d'occupation du sol (en millions de tonnes de carbone).

pays elle joue un rôle très important, très variable cependant selon les régions^[3]. De plus, elle est en augmentation surfacique, mais après une longue phase de régression.

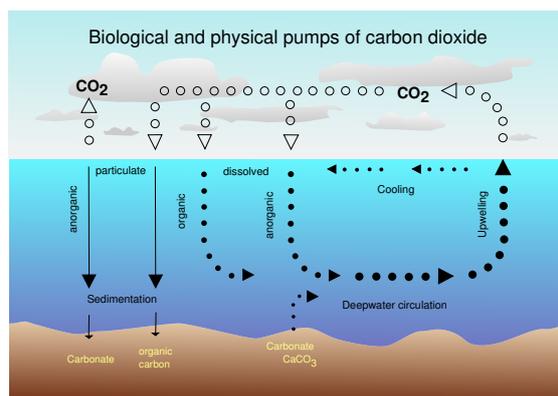
En termes quantitatifs, différentes estimations ont été faites pour la France métropolitaine. Un premier chiffre de deux milliards de tonnes environ (en 1990^[7]) a été porté en 2004^[8] à 2,5 milliards de tonnes de carbone (soit l'équivalent de 9,2 milliards de tonnes de CO₂ absorbé). Cette quantité de carbone serait stockée pour moitié dans les sols (litière plus humus) et plus provisoirement peut-être pour moitié dans les arbres (feuilles, branches, racines y compris)^[8]. Seule une petite partie de ce carbone peut être considéré comme durablement stockée.

En termes de monétarisation, de 2000 à 2004, environ 24,4 millions de tonnes (Mt)/an de carbone auraient ainsi été provisoirement *séquestrées* par les arbres et les sols forestiers (89 Mt/an de CO₂). Le prix de la tonne de CO₂ stockée a chuté de 32 € en avril 2006, puis 20 € en 2007, ce serait 0,6 milliard d'euros, 2,8 milliards d'euros et 0,02 milliard d'euros économisés^[8]. Cette variation des prix dictée par le marché ne permet pas d'évaluer la valeur financière de la fonction puits de carbone des forêts, mais cette valeur devrait a priori augmenter avec le temps.

La filière bois, selon la durée de vie du bois extrait et manufacturé, contribue ou non à la lutte contre le réchauffement climatique. Elle a en 2004 utilisé 98 Mt de carbone (équivalant 359 Mt de CO₂) mais dont une partie (papier, carton, cagettes, etc.) ne contribue pas à stocker du carbone^[8].

1.2 Océans

Les océans sont les principaux puits naturels de carbone, assimilé via le plancton, les coraux et les poissons, puis



Cycle du carbone dans les océans.



Le blanchiment des récifs coralliens (ici à la Réunion) a des causes encore mal comprises, peut-être liées à des microbes, à l'eutrophisation, l'acidification des eaux et/ou aux prémices de changement climatique. Il préoccupe les experts du monde entier.



À Leicester, ville peu boisée, une étude^[19] a estimé que les espaces verts publics et privés stockent environ 231 500 t de carbone, dont 97 % dans les arbres urbains (surtout les plus grands).

transformé en roche sédimentaire ou biogénique. Ils absorberaient environ 50 % du carbone émis dans l'air (sous forme de carbone dissous ou minéral).

Mais 50 % environ des coraux des eaux chaudes semblent malades ou morts ces dernières décennies, et lorsque le niveau de CO₂ s'accroît au-delà d'un seuil critique dans l'atmosphère, en augmentant également l'acidité des eaux marines, créant potentiellement de désastreux océans acides qui pourraient tuer le plancton qui piègeait le

mieux le carbone, et rendant l'océan plus acide encore. De plus des zones mortes s'étendent dans les océans, qui deviennent émettrices de carbone ou de méthane. Les mers contiennent une quantité variable de CO₂ dissoute, fonction de la biomasse et de la nécromasse, de la disponibilité en nutriments, de la température et de la pression.

Le phytoplancton marin, à l'instar des arbres, utilise la photosynthèse pour extraire le carbone du CO₂. Il est le point de départ de la chaîne alimentaire océanique. Le plancton et d'autres organismes marins utilisent le CO₂ dissous dans l'eau ou prélevé dans leur nourriture pour constituer leurs squelettes et coquilles à base de calcaire minéral, CaCO₃. Ce mécanisme élimine le CO₂ contenu dans l'eau et favorise la dissolution de celui contenu dans l'air. Les squelettes et coquilles calcaires ainsi que le « carbone organique » (nécromasse, excréments et excréments) de ces organismes tombent finalement en une « pluie » continue (dite « Neige marine ») dans les fonds marins où ils sédimentent pour lentement former des roches sédimentaires. Le carbone des cellules du plancton doit être immergé entre 2 000 et 4 000 mètres de profondeur pour être emprisonné pour plusieurs milliers à millions ou milliards d'années sous forme de roche, les sédiments superficiels étant pour partie brassés, remis en suspension et réutilisés comme nutriments par la biosphère.

1.2.1 Résultats contradictoires sur l'état et capacités des puits de carbone océaniques

- Une étude qui cherchait à affiner la mesure de la dissolution récente du CO₂ dans l'océan (utilisant les chlorofluorocarbones comme marqueurs), publiée en 2003 laissait penser que la capacité des océans à absorber le CO₂ avait été sous-estimée^[10], cependant ceci est aussi le signe d'une accélération de l'acidification des océans qui peut mettre en péril les puits de carbone océanique et se traduire par un relargage de CO₂.
- Inversement, des travaux récents concluent à une émission importante de CO₂ et de méthane par les estuaires, et à une saturation du puits océanique pour l'hémisphère sud, ou plutôt à une dégradation de la capacité de ces mers à pomper du carbone en raison des changements climatiques qui affectent les vents et l'agitation de l'eau. Selon Nicolas Metzl et son équipe, les mesures faites de 1998 à 2007 par le service d'observation de l'océan indien (OISO) et les données accumulées depuis 1991 montrent que le taux de CO₂ a augmenté plus vite dans les eaux de surface de cet océan que dans l'air (sachant que la diffusion du CO₂ dépend de la température et de la différence de concentration dans l'air et l'eau). Cependant, les vents ont augmenté dans l'hémisphère sud, induisant un brassage des eaux de surface qui leur font perdre du CO₂, et qui induisent un mélange avec les eaux profondes plus riches en CO₂. Les puits de carbone de l'océan indien pourraient

donc être environ 10 fois moins efficace qu'on ne l'avait antérieurement estimé.

Un autre programme, européen, CARBOOCEAN a également conclu à une situation mauvaise au nord : la capacité de puits de CO₂ aurait été divisée par deux aux latitudes élevées de l'hémisphère nord, depuis 1996.

Les hydrates de méthane piégés dans l'océan sont également un facteur à prendre en compte en cas de début de réchauffement marqué, qu'ils pourraient accélérer.

Ces quatre éléments, sous réserve de confirmation pourraient significativement modifier les modélisations quand elles les intègreront^[11].

- Une étude^[12] du début 2009 a montré qu'on avait fortement sous-estimé l'importance des poissons qui, par leur capacité à constamment produire dans leur intestin des carbonates peu solubles, contribuent aussi à séquestrer du carbone des eaux marines. Par exemple, le flet européen synthétise et rejette chaque heure et en moyenne 18 micromoles de carbone par kg de poisson (sous forme de calcite)^[12]. Les poissons contribueraient ainsi à 3 %^[13] à 15 %^[14] du puits de carbone océanique (voire 45 % si l'on prenait les hypothèses les plus hautes)^[12]. De plus, un climat chaud associé à la surpêche tendent à réduire le nombre de grands poissons ; or, une petite taille du poisson et un eau plus chaude favorisent la formation de carbonates de calcium ou de magnésium (qui sont éliminés avec la nécromasse, les fèces ou des boulettes de mucus)^[12]. Hélas, ces carbonates plus riche en magnésium sont aussi plus solubles à grande profondeur. Ils peuvent alors relarguer une partie de leur carbone, mais en tamponnant le milieu, au point que cela pourrait expliquer jusqu'à un quart de l'augmentation de l'alcalinité titrable des eaux marines dans les 1 000 mètres sous la surface (cette anomalie de dureté de l'eau était jusqu'ici controversée car non expliquée par les océanographes)^[12]. Hélas encore, c'est aussi dans les zones les plus favorables à ce piégeage du carbone (plateaux continentaux où se concentre environ 80 % de la biomasse en poisson) que la surpêche est la plus intense et que les zones mortes ont fait disparaître le plus de poissons.

1.2.2 Rôle encore mal compris de la grande faune marine

Selon^[15] l'université Flinders (Australie), le cachalot joue par exemple un rôle important dans le recyclage du fer, via ses excréments qui en contiennent de grandes quantités ; le fer - quand il est biodisponible - est un stimulant connu de la photosynthèse phytoplanctonique, qui est à la base de la pompe à carbone océanique^[15]. Les 12 000 cachalots d'Antarctique contribuent ainsi à permettre l'absorption d'environ 400 000 t de carbone (environ deux

fois ce que les cachalots émettent en respirant). Leurs excréments dispersent annuellement environ 50 t/an (de fer) dans l'océan, ce serait au moins dix fois plus, s'ils n'avaient pas été pourchassés depuis deux siècles^[15]. Sans la pêche baleinière, on estime qu'il y aurait aujourd'hui environ 120 000 (90 % plus que dans l'actualité) cachalots rien que dans l'océan Antarctique^[15].

2 Améliorer la séquestration naturelle

Cette section **ne cite pas suffisamment ses sources**. Pour l'améliorer, ajoutez des références vérifiables [Comment faire ?] ou le modèle {{Référence nécessaire}} sur les passages nécessitant une source.

2.1 Séquestration par l'arbre et la forêt

Les forêts sont des réservoirs importants de carbone, par leur biomasse et nécromasse, et via leur sol (certains sols forestier tourbeux d'Indonésie atteignent 40 mètres d'épaisseur). Ce puits de carbone est cependant faible dans certaines forêts, et il n'existe que si elles grandissent ou si leur sol s'enrichit durablement en carbone. Les incendies répétés peuvent leur faire perdre une part importante du carbone stocké durant des décennies ou siècles.

La séquestration forestière reste faible au regard des rejets de CO₂ liés à la combustion de carbone fossile (charbon, pétrole et gaz naturel). Il y a un consensus sur l'importance de protéger les forêts relictuelles, notamment contre les incendies de forêt, mais même les scénarios les plus optimistes concluent que massivement planter de nouvelles forêts ne suffirait pas à contrebalancer l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre ni endiguer le réchauffement climatique. Par exemple, la **réduction des émissions américaines de carbone de 7 %**, comme stipulé dans le protocole de Kyōto, **nécessiterait la plantation d'une forêt de la taille du Texas tous les 30 ans**, selon William H. Schlesinger, doyen de l'« École Nicolas sur l'environnement et les sciences de la terre » à l'université Duke de Durham, N.C... Pour compenser leurs émissions, la plupart des régions développées devraient planter une surface bien plus grande que l'ensemble de leur territoire. Il faudrait au total boiser une surface plus grande que celle qui est disponible sur les terres émergées (champs, villes et routes inclus). Néanmoins, le potentiel n'est pas négligeable, surtout si l'on vise des bois durs et denses et l'enrichissement des sols en matière organique, en zone tempérée notamment.

Le type de forêt a une importance : les forêts tempérées sont celles qui poussent le plus vite, mais les forêts tourbeuses plus nordiques forment d'autres types de puits de carbone également (tourbières). Les forêts tropicales ont d'abord été jugées neutres à l'égard du carbone, mais

une étude récente^[16] (mesures faites sur deux millions d'arbres dans le monde) a montré qu'elles étaient globalement aussi des puits de carbone, fonction qui pourrait bientôt être limitée par le stress hydrique.

Le type de gestion importe également : une très jeune forêt plantée sur coupe rase peut avoir un bilan-carbone négatif les dix ou douze premières années, perdant plus de carbone qu'elle n'en stocke. La coupe rase favorise en outre souvent l'érosion des sols et la perte du carbone qu'ils contenaient (significative en zone tempérée et froide).

Le « réseau forestier de puits CO₂ » à long terme est exposé aux incendies, aux tempêtes, aux maladies qui peuvent être exacerbées par un « effet local de refroidissement » dû à l'absorption de carbone lors de la pousse des forêts peut être contre-balancé par les effets de la forêt sur la réflexion de la lumière solaire, ou albédo. Les forêts de haute à moyenne latitude ont un effet albédo plus faible durant les périodes de neige que les forêts enneigées de latitude basse, contribuant au réchauffement climatique. Divers programmes proposent à des entreprises d'acheter des parcelles de forêt pour les protéger (ex action « *Cool Earth* »), en échange de « crédits-carbone » compensant des émissions industrielles ou de particuliers. Cette approche est discutée. Ainsi en octobre 2007, Davi Kopenawa (chamane amérindien (yanomami) ayant obtenu le prix Global 500 du PNUE en 1991) a remis à Gordon Brown (1^{er} ministre britannique) un rapport montrant que la protection de la forêt par la reconnaissance des droits fonciers de leurs populations autochtones permettrait de protéger rapidement 15 000 fois la surface concernée par le programme « *Cool Earth* » (162 millions d'ha de forêt tropicale ont déjà ainsi été protégées, par reconnaissance des droits des populations qui y vivent, suite notamment au mouvement lancé par Chico Mendes dans les années 1970)^[17]

2008. Selon l'étude de Beverly Law menée sur 519 plots forestiers âgés de l'hémisphère nord, ces arbres anciens ont bien un bilan de capture de CO₂ positif.

L'arbre urbain et la forêt urbaine jouent un rôle très mineur par rapport aux émissions urbaines, mais leur capacité de stockage semble avoir été sous-estimée ; Une étude faite à Leicester^[9] de ses puits de carbone (publiée en 2011) a montré que la flore urbaine y stockait en tout 231 521 tonnes de carbone, soit 3,16 kg·m⁻² en moyenne. Les jardins privés en stockent plus que le milieu rural agricole (environ 0,76 kg, soit un peu plus qu'une prairie anglaise (0,14 kg·m⁻²).

Mais ce sont surtout les grands arbres urbains qui formaient le principal puits de carbone (stockant plus de 97 % de la quantité totale de carbone de la biomasse végétale totale urbaine), avec en moyenne 28,86 kg·m⁻² pour les espaces verts publics boisés. Or, les grands arbres sont rares à Leicester où les espaces verts sont surtout engazonnés et pauvres en arbres^[9]. Si 10 % de ces gazons étaient plantés d'arbres, le stockage de carbone de la ville augmenterait de 12 % selon cette étude qui a aus-

si montré que les estimations existantes au Royaume-Uni avaient sous-estimé d'un ordre de grandeur l'importance de ce stock urbain de carbone^[9].

2.2 Séquestration océanique

Article détaillé : [Fertilisation de l'océan](#).

L'océan est le principal puits de carbone planétaire, mais il est saturé et semble commencer à s'acidifier.

L'ajout de micro-particules de fer (hématite) ou de sulfate de fer dans l'eau a été proposé pour doper la séquestration du carbone par l'océan par le plancton. Le fer naturel est un oligoélément, facteur limitant pour la croissance du phytoplancton. Il provient des remontées d'eau le long de côtes (« upwellings »), des rivières et dépôts d'aérosols et poussières. Certains estiment que les sources naturelles de fer diminuent depuis quelques décennies, limitant la productivité organique et la biomasse océaniques (NASA, 2003) et donc le pompage biologique du CO₂ atmosphérique par la photosynthèse.

En 2002, un test dans l'océan Pacifique près de l'Antarctique a suggéré qu'*entre 10 000 et 100 000 atomes de carbone sont absorbés lorsqu'un atome de fer est ajouté dans l'océan*. Des travaux allemands (2005) ont laissé penser que tout type de biomasse carbonique des océans, soit enfoui en profondeur, soit recyclé dans la zone euphotique, représente un stockage à long terme du carbone. L'apport de nutriments ferreux dans des zones sélectionnées de l'océan, à juste mesure, pourrait alors doper la productivité océanique et limiter les effets désastreux des émissions humaines de CO₂ dans l'atmosphère.

Le P^r Wolfgang Arlt de l'université d'Erlangen-Nuremberg (Allemagne) propose d'injecter du CO₂ dissous à grande profondeur, en veillant à le répartir à l'échelle planétaire et en le tamponnant éventuellement avec des substances alcalines. Il estime que ce CO₂ n'aurait qu'un faible impact en termes d'acidification s'il était injecté dans des eaux froides et denses plongeant dans l'océan profond, et que le CO₂ ainsi injecté près de l'Europe serait redistribué jusqu'en Australie en un siècle, selon lui sans affecter la vie marine ni la vie des fonds marins.

D'autres doutent de la fiabilité de la méthode, notamment à long terme. Ils argumentent que les effets globaux d'adjonction de fer sur le phytoplancton et sur les écosystèmes océaniques sont mal connus, et nécessitent des études plus poussées.

- Le phytoplancton produit des nuages via la libération de sulfure de diméthyle (DMS) qui est converti en aérosols sulfatés dans l'atmosphère et formant un noyau de condensation nuageuse (ou CCN en anglais), l'eau vapeur étant un gaz à effet de serre et les nuages contribuant à modifier l'insolation et donc la

photosynthèse.

- Le risque d'eutrophisation et d'acidification doit être localement pris en compte, alors que les zones marines mortes sont plus nombreuses et s'étendent.
- Enfin, ce sont les mers du Sud qui se sont montrées pauvres en fer, alors qu'il ne manque pas dans l'hémisphère Nord, là où les émissions de CO₂ sont les plus importantes et où la bioproduktivité est la plus élevée.
- Une campagne (KEOPS^[18]) a montré^[19] autour des îles Kerguelen, zone de floraison estivale annuelle de phytoplancton, que le phénomène était corrélé à la présence de fer venant des eaux profondes, mais que le puits de carbone était au moins deux fois plus important avec le fer naturel que dans le cas d'une fertilisation artificielle, et qu'il fallait bien moins de fer dans le cas de cette « fertilisation » naturelle qui s'est montrée plus de 10 fois plus efficace que les expérimentations d'ensemencement de la mer en fer. Ceci jette le doute sur les propositions d'intervention par l'homme (*géo-ingénierie*), tout en confirmant l'importance des apports naturels de fer qui pourraient aussi être modifiés par des modifications des courants profonds, ce qui pourrait expliquer certaines fluctuations paléoclimatiques.

L'IPCC reste très prudent sur les capacités de l'océan à absorber plus de carbone, mais juge que l'étude des impacts et du comportement du CO₂ dans l'océan profond doit être mieux étudié. L'OMI et la convention de Londres ont estimé fin 2008 que les activités de *fertilisation de l'océan* autres que pour des expérimentations scientifiques devaient être interdites^[20].

Le cycle du méthane dans les écosystèmes et dans les eaux est par ailleurs encore également mal connu.

La recherche se poursuit, dont sous l'égide de conventions (OSPAR, ou de résolutions du réseau de collectifs KIMO^[21]).

2.3 Sols

On estime que les sols stockaient à la fin du XX^e siècle environ 2 000 gigatonnes de carbone sous forme de matière organique. C'est presque trois fois le carbone atmosphérique, et quatre fois le carbone de la biomasse végétale. Mais cette fonction se dégrade rapidement et presque partout, dans les sols agricoles labourés surtout. L'augmentation des quantités d'humus et de matière organique permettraient d'améliorer la qualité de ces sols et la quantité de carbone séquestré. Le semis direct, la vraie jachère la restauration de sols vivant par des techniques de type BRP (Bois raméal fragmenté) peuvent y contribuer.

Le sous-sol stocke deux fois plus que le sol très superficiel.

- Les prairies accumulent d'énormes quantités de matières organiques, essentiellement sous forme de racines et micro-organismes, de manière relativement stable sur de longues durées. Mais dans le monde, depuis 1850, une grande partie de ces prairies ont été converties en champs ou urbanisées, perdant ainsi par oxydation de grandes quantités de carbone.
- Une agriculture sans labour augmente le carbone stocké dans le sol, y compris en zone tempérée (testée par exemple à Boigneville en France dans le Bassin parisien où l'on a ainsi obtenu un doublement du stockage annuel de carbone sous une rotation maïs-blé dans le sol les 20 premières années (passant d'environ 0,10 t de C/ha et par an à 0,20), après quoi un effet de saturation semble intervenir^[22],
- une conversion de champs en pâturage bien gérée emprisonne encore plus de carbone.
- Les mesures de lutte contre l'érosion, le maintien d'une couverture végétale hivernale et une rotation des cultures augmentent aussi le taux de carbone des sols.

L'augmentation du CO₂ de l'air pourrait ne pas être compensé par une plus grande séquestration dans les sols. Une étude^[23] a montré que l'exposition longue à un doublement du taux de CO₂ atmosphérique accélère fortement la dégradation de la matière organique des sols forestiers d'un boisement de chênes (⇒ déstockage de carbone du sol). Les arbres ont stocké plus de carbone (212 g/m² en aérien et 646 g/m² dans les racines), mais 442 g/m² de carbone ont été perdus dans le sol, essentiellement dans les 10 cm superficiels, en raison semble-t-il des impacts du CO₂ sur le sol (acidification et stimulation de l'activité enzymatique des micro-organismes du sol qui augmente la décomposition de la matière organique, et plus encore s'il y a des apports carbonés (litière)). Cette étude doit être confirmée par des études sur sols riches, car il s'agissait ici de sols pauvres où le carbone était à 75 % constitué de chaînes carbonées fragiles.

3 Séquestration artificielle

Article détaillé : Stockage géologique du dioxyde de carbone.

Pour séquestrer du carbone artificiellement (i.e. sans utiliser le processus naturel de cycle de carbone), il doit préalablement être capturé. Ensuite, il est stocké par différents moyens.

Les usines de purification du gaz naturel doivent éliminer le dioxyde de carbone, pour éviter que la glace carbonique obstrue les camions-citernes ou empêcher les concentrations de CO₂ d'excéder les 3 % maximum permis sur le réseau de distribution de gaz naturel.

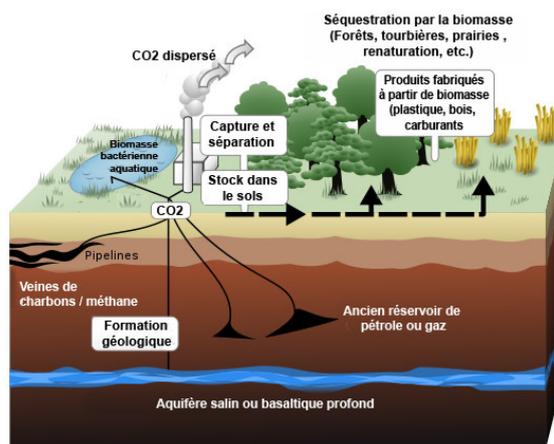


Schéma de principe de la séquestration artificielle du carbone produit par une centrale électrique au fioul, ou de sa valorisation comme engrais (maïs acidifiant, et avec un effet de seuil).

Au-delà, une des techniques les plus prometteuses d'emprisonnement de carbone est la capture du CO₂ provenant des fumées de centrales électriques (dans le cas du charbon, ceci est connu en tant que « charbon propre »). Typiquement, une station électrique récente produisant mille mégawatts par combustion du charbon rejette environ 6 millions de tonnes de CO₂ annuellement. De plus, une usine de charbon de 1 000 MW requiert le stockage de 50 millions de barils de CO₂ par an. Les coûts de production de l'électricité sont réduits quand la technologie de gazéification du charbon est utilisée dans les nouvelles installations, bien que cette électricité coûte 10 à 12 % plus cher que celle produite par combustion de carbone fossile.

Attention, dans le chapitre ci-dessus, il y a une erreur d'unité ! Ce n'est pas la puissance d'une installation qui produit du CO₂, mais c'est une quantité d'énergie produite donnée qui doit être exprimée en KWh MWh GWh J KJ MJ GJ etc...

Le transport du dioxyde de carbone devra répondre à des normes de sécurité sévères, étant donné qu'il est mortel à des concentrations supérieures à 10 %, comme l'a montré le tragique dégazage du lac Nyos. La conception de bateaux de transport de dioxyde de carbone sur le même principe que les méthaniers est à l'étude.

3.1 Capture du carbone

Actuellement, l'absorption du CO₂ se fait à grande échelle au moyen de dissolvants aminés, surtout avec l'éthanolamine (2-aminoéthanol, selon la nomenclature UICPA). D'autres techniques sont à l'étude, comme l'absorption par variation rapide de température/pression, la séparation des gaz et la cryogénie.

Dans les centrales électriques à charbon, les principales alternatives aux absorbeurs de CO₂ à base d'amine sont la gazéification du charbon et la combustion oxygène-

fioul. La gazéification produit un gaz primaire constitué d'hydrogène et de monoxyde de carbone, qui est brûlé pour donner du dioxyde de carbone. La combustion oxygène-fioul brûle le charbon avec de l'oxygène à la place de l'air, produisant ainsi uniquement du CO₂ et de la vapeur d'eau, facilement séparables. Cependant, cette combustion produit une température extrême et les matériaux supportant cette température restent à créer.

Une autre option à long terme est la capture du carbone de l'air en utilisant des hydroxydes. L'air sera littéralement dépouillé de tout son CO₂. Cette idée est une alternative aux combustibles non fossiles pour le secteur des transports (voiture, camion, transports en commun, etc.).

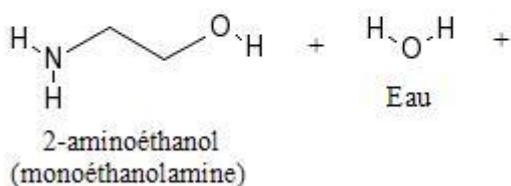
Un test mené à l'usine d'électricité de 420 mégawatts de la société Elsam, à Esbjerg (Danemark) a été inauguré le 15 mars 2006^[24] dans le cadre du projet européen *Castor* piloté par l'Institut français du pétrole (IFP) qui rassemble une trentaine de partenaires industriels et scientifiques. Ce procédé postcombustion doit permettre de diviser de moitié le coût de capture du CO₂, le ramenant entre 20 et 30 euros la tonne.

Son coût sur quatre ans (2004-2008) est de 16 millions d'euros, dont 8,5 millions sont financés par l'Union européenne. *Castor* vise à valider des technologies destinées aux grosses unités industrielles - usine électrique, aciérie, cimenterie, etc. -, dont l'activité engendre 10 % des émissions européennes de CO₂, afin que cette technique soit en rapport avec le prix européen des permis d'émission de CO₂ (alors à 27 € la tonne).

4 Capture post-combustion

Les rejets de centrales thermiques sont constitués de moins de 20 % de dioxyde de carbone. Ainsi, avant de l'enfouir sous la terre, il faut le capturer : c'est la capture post-combustion. En étant en contact avec des gaz acides (comme le CO₂), une solution aqueuse de 2-aminoéthanol forme un sel à température ambiante. La solution est alors transportée dans un milieu fermé où elle est chauffée à environ 120 °C, ce qui, selon le principe de Le Châtelier, libère le CO₂ (pur) et régénère, en solution aqueuse, le 2-aminoéthanol.

Réaction favorisée à chaud (120°C) qui libère le dioxyde de carbone



4.1 Océans

L'injection directe du carbone dans l'océan est un autre type de séquestration envisageable. Dans cette méthode, le CO₂ est enfoui dans les eaux profondes, afin de former un « lac » de CO₂ liquide piégé par la pression exercée en profondeur. Des expériences menées entre 350 et 3 600 mètres indiquent que le CO₂ liquide réagit à la pression en se solidifiant en hydrate de méthane, qui se dissout graduellement dans les eaux environnantes. L'emprisonnement n'est donc que temporaire.

Cette technique a des conséquences environnementales dangereuses. Le CO₂ réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique H₂CO₃. L'équilibre biologique des fonds marins, mal connu, sera probablement affecté. Les effets sur les formes de vie benthique des zones pélagiques sont inconnus. D'un point de vue politique, il n'est pas certain que le stockage du carbone dans ou sous les océans soit compatible avec la Convention de Londres sur la prévention de la pollution marine.

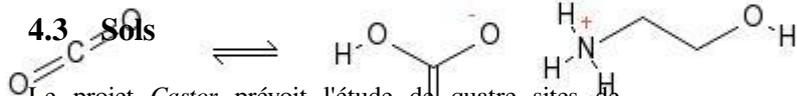
Une autre méthode de séquestration océanique à long terme est le rassemblement de résidus de récoltes (comme les fanes de blés ou l'excès de paille) dans de grands ballots de biomasse, puis leur dépôt dans les zones « d'éventails alluviaux » (*alluvial fan*) des bassins océaniques profonds. Immerger ces résidus dans les éventails alluviaux aura pour effet de les enterrer rapidement dans la vase du plancher océanique, emprisonnant la biomasse pour un temps très important. Les éventails alluviaux existent dans tous les océans et mers du monde où les rivières des deltas se jettent dans le plateau continental, comme pour l'éventail alluvial du Mississippi dans le golfe du Mexique et l'éventail du Nil dans la mer Méditerranée.

4.2 Utilisation spécifique d'algues

La ville de Libourne envisage d'équiper un de ses parkings de « lampadaires absorbants de CO₂ ». Ils se trouveraient munis d'un réservoir contenant des algues. Celles-ci, placées à proximité d'une source de lumière, absorberaient le dioxyde de carbone et émettraient du dioxygène^[25].

La sélection d'organismes adaptés permet d'envisager d'importants rendements. On estime qu'un dispositif de ce type d'un volume de 1,5 m³ pourrait absorber jusqu'à une tonne de CO₂ par an.

Réaction favorisée à froid (25°C) qui capture le dioxyde de carbone



4.3 Sols

Le projet *Castor* prévoit l'étude de quatre sites de stockage géologique du CO₂ : Le réservoir pétrolier de Casablanca qui se situe au large des côtes nord-est de l'Espagne, le gisement de gaz naturel d'Atzbach-Schwanenstadt (Autriche), l'aquifère de

Snohvit (Norvège) et le gisement de gaz naturel K12B exploité par Gaz de France au large de la Hollande, desquels il est nécessaire de s'assurer de l'étanchéité. D'autres projets d'esprit similaire sont en cours de par le monde.

Selon le BRGM^[26], les 20 milliards de tonnes de dioxyde de carbone émis chaque année devront être stockées dans les aquifères salins. Ces derniers sont des nappes d'eau trop salées pour être exploitées. Leur capacité d'accueil est estimée de 400 à 10 000 milliards de tonnes, à comparer aux 40 milliards des gisements de charbons inaccessibles, aux 950 milliards des gisements d'hydrocarbures et aux 20 milliards des émissions annuelles actuelles. Le gaz doit être injecté à une profondeur d'au moins 800 mètres sous 800 bars de pression, à une température de 40 °C, sous une forme « supercritique » en équilibre avec son environnement. Il formera progressivement de l'eau gazeuse.

4.4 Stockage géologique

Article détaillé : Stockage géologique du dioxyde de carbone.

Aussi connu sous le nom de *séquestration géologique* (et plus rarement *géoséquestration*), cette technique utilise l'injection de dioxyde de carbone directement dans des formations géologiques souterraines. Les champs de pétroles et aquifères salins qui ne sont plus exploités sont des sites de stockage idéals. Les cavernes et anciennes mines, communément utilisés pour stocker le gaz naturel, ne sont pas utilisées à cause d'un manque de sécurité dans le stockage.

Le CO₂ a été injecté dans les champs de pétroles en déclin depuis plus de 30 ans, afin d'augmenter le taux de régénération du pétrole. Cette option est intéressante car le coût de stockage est compensé par la vente du pétrole additionnel qui a été régénéré. D'autres bénéfices de cette technique proviennent de l'usage d'infrastructures existantes et des données géophysiques et géologiques obtenus par l'exploration du pétrole. Tous les champs de pétrole disposent d'une barrière géologique empêchant la remontée de fluides gazeux (tel le CO₂ dans le futur).

Les inconvénients des champs de pétrole résident dans leur distribution géographique et leur capacité limitée.

5 Puits de carbone et protocole de Kyōto

Le protocole de Kyōto affirmant que la végétation absorbe du CO₂, les pays ayant des forêts étendues peuvent en déduire une certaine partie de leurs émissions (article 3, alinéa 3 du protocole de Kyōto) ; leur facilitant l'accès au niveau d'émission qui leur a été fixé.

On estime qu'en 2030, les combustibles fossiles représenteront encore plus des trois quarts de l'énergie utilisée. Ceux qui sauront piéger le CO₂ à sa source (22 % des émissions viennent de l'industrie, 39 % de la production électrique) auront un levier puissant sur le futur marché mondial des quotas d'émissions^[24].

6 Voir aussi

6.1 Articles connexes

- Cycle du carbone
- Carbone fossile
- Réchauffement climatique
- Gaz à effet de serre
- Terra preta (sols amazoniens produits par l'homme, à très haute teneur en carbone)
- Tourbière, Bois-mort, Humus, Matière organique
- Sol, Agriculture sans labour
- Field-Map - technologie pour le suivi des stocks de carbone

6.2 Documentaires

- Nicolas Koutsikas et Stephan Poule, *Carbon Public Enemy No 1*, Georama TV/BlueWing/2d3d Animations/ERT, sur *carbon-the-film.com*

6.3 Bibliographie

- Arrouays D. *et al.* Estimation de stocks de carbone organique des sols à différentes échelles d'espace et de temps, reçu : mai 2003, accepté : novembre 2003, *Étude et Gestion des Sols*, vol. 10, 4, 2003, p. 347-355
- Apps M.-J. (2003). *Les forêts, le cycle mondial du carbone et le changement climatique*. Actes du XII^e Congrès forestier mondial, Québec, Canada, 2003. (consulté le 8 octobre 2007).
- Dupouey Jean-Luc, Pignard Gérard (2001). *Quelques problèmes posés par l'évaluation des flux de carbone forestier au niveau national*. Revue Forestière Française, n^o spécial *les 40 ans de l'IFN*, 3-4-2001
- Dupouey Jean-Luc, Pignard Gérard, Hamza Nabila (2006). INRA, *La séquestration de carbone en forêt* ; consulté le 5 octobre 2007.

- EurObserv'ER (2006), *Le baromètre biomasse solide*, Systèmes solaires n° 176, décembre 2006, lire en ligne, consulté le 25 octobre 2007.
- IFN (Inventaire Forestier National) (2005). L'IF n° 7, *La forêt française : un puits de carbone ? Son rôle dans la limitation des changements climatiques* [PDF] en ligne. L'IF, mars 2005.
- Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables (2006). *Qu'est-ce qu'un projet domestique CO₂ ?*; décembre 2006.
- Pignard Gérard (2000). *Évolution récente des forêts françaises : surface, volume sur pied, productivité*. Revue Forestière Française, Tome LII, n° spécial 2000, p. 27-36.
- Pignard Gérard, Hamza Nabila, Dupouey Jean-Luc (2004). *Estimation des stocks et des flux de carbone dans la biomasse des forêts françaises à partir des données de l'Inventaire forestier national*, In Loustau Denis (coord.). Rapport final du projet CARBOFOR : Séquestration de Carbone dans les grands écosystèmes forestiers en France. Quantification, spatialisation, vulnérabilité et impacts de différents scénarios climatiques et sylvicoles, juin 2004.

(lire en ligne)

6.4 Liens externes

- Note de Manicore sur la capacité des puits de carbone à absorber ou non le surplus de CO₂
- Pour voir l'évolution des puits de carbone de 1850 à nos jours, animation Flash

7 Références

- [1] Article 83 de la Loi Grenelle II, p. 115/308 de la version [PDF]
- [2] Giec, Changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse. Résumé à l'intention des décideurs, 2001, 37 p.
- [3] Voir carte mondiale, in Joël Boulier, *Géographie et environnement ; Les forêts au secours de la planète : quel potentiel de stockage du carbone ?*; L'Espace géographique 2010/4 (t. 39), 98 p., Belin; (ISBN 9782701156217) (Résumé)
- [4] (en) *The case of the missing sink*
- [5] Évaluation des ressources forestières mondiales 2010; Rapport principal, évaluation la plus complète jamais faite des forêts mondiales jamais effectuée, pour 233 pays et zones et pour la période 1990 à 2010 et pour plus de 90 variables clés relatives à l'étendue, l'état, les utilisations et les valeurs des forêts.. Version francophone, FAO, 2010
- [6] (en)Is Europe an underestimated sink for carbone dioxide ?, site de l'Agence spatiale européenne, 5 janvier 2015.
- [7] IFN, *La forêt française : un puits de carbone ? son rôle dans la limitation des changements climatiques*, l'IF, 7 mars 2005
- [8] *L'environnement en France*, Édition 2010 - Coll. Références Commissariat général au développement durable, juin 2010 par le service de l'observation et des statistiques
- [9] Zoe G. Davies, Jill L. Edmondson, Andreas Heinemeyer, Jonathan R. Leake et Kevin J. Gaston, *Mapping an urban ecosystem service : quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale*, *Journal of Applied Ecology*, vol. 48, Issue 5, p. 1125–1134, octobre 2011 ; en ligne le 11 juillet 2011 ; DOI :10.1111/j.1365-2664.2011.02021.x (Résumé)
- [10] (en) McNeil *et al.*, *Anthropogenic CO₂ Uptake by the Ocean Based on the Global Chlorofluorocarbon*, *Science*, 10 janvier 2003, 235, DOI :10.1126/science.1077429 (résumé)
- [11] Deep-sea Research, Par II, Colloque SOCOVV, Unesco/IOCCP, 8 février 2009
- [12] R. W. Wilson ; F. J. Millero ; J. R. Taylor ; P. J. Walsh ; V. Christensen ; S. Jennings ; M. Grosell ; « *Contribution of Fish to the Marine Inorganic Carbon Cycle* » ; *Science*, 16 janvier 2009, vol. 323, n° 5912, p. 359, 362, DOI :10.1126/science.1157972 ; 2009
- [13] ...si on estime qu'il y a 812 millions de tonnes de poissons dans les mers (fourchette basse)
- [14] ...si l'on estime qu'il y a 2,05 milliards de tonnes (fourchette haute crédible)
- [15] Trish J. Lavery, Ben Roudnew, Peter Gill, Justin Seymour1, Laurent Seuront, Genevieve Johnson, James G. Mitchell1 et Victor Smetacek ; *Iron defecation by sperm whales stimulates carbon export in the Southern Ocean* ; *Journal de recherche biologique de la Royal Society* : Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences ; en ligne (ISSN 1471-2954) ([résumé])
- [16] Chave J, Condit R, Muller-Landau HC, Thomas SC, Ashton PS, *et al.* (2008), *Assessing Evidence for a Pervasive Alteration in Tropical Tree Communities*, *PLoS Biol.* 6(3) : e45
- [17] Source : *Courrier international* du 24 novembre 2007, et *Survival International*
- [18] *Kerguelen Ocean and Plateau compared Study*, associant seize laboratoires de recherche dans le monde (français, australien, belge et néerlandais)
- [19] Stéphane Blain *et al.*, *Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean*, *Nature*, 26 avril 2007.
- [20] Communiqué de la Convention de Londres et de l'OMI intitulé *Ocean fertilization operations should be allowed only for research, say Parties to international treaties*

- [21] KIMO, *Résolution 2/99 ; The Ocean Dumping of CO₂ programme*
- [22] A. Metay, B. Mary, D. Arrouays, J. Labreuche, M. Martin, B. Nicolardot, J.-C. Germon, *Effets des techniques culturales sans labour sur le stockage de carbone dans le sol en contexte climatique tempéré ; Canadian Journal of Soil Science*, 2009, 89 : (5) 623-634, 10.4141/CJSS07108 (Résumé)
- [23] Expérience faite par le Smithsonian Environmental Research Center, dans le *Merritt Island Wildlife Refuge*, (Cape Canaveral, Floride) sur des chênes de Turquie (*Quercus laevis*) poussant sur **sols pauvres** et exposés six ans à un doublement du taux de CO₂. Source : Karen M. Carney, Bruce A. Hungate, Bert G. Drake et J. Patrick Megonigal, *Altered soil microbial community at elevated CO₂ leads to loss of soil carbon*, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, publié le 13 mars 2007, 10.1073/pnas.0610045104, (texte intégral)
- [24] *Le Monde* du 19 mars 2006
- [25] Archives du *Monde*, lampadaires à algues-absorbants de CO₂ de Libourne, proposés par la société Tyca
- [26] Cité par *Libération*, 3 juin 2006, p. 37



- Portail de l'environnement



- Portail de la chimie

8 Sources, contributeurs et licences du texte et de l'image

8.1 Texte

- **Puits de carbone** *Source* : http://fr.wikipedia.org/wiki/Puits_de_carbone?oldid=115297338 *Contributeurs* : Herman, Symac, Khalid hasani, Phe, VIGNERON, Phe-bot, Vincnet, Emirix, Chris93, Mirgolth, Raminagrobis, DocteurCosmos, Wart Dark, Stéphane33, Sebdl, David Berardan, Gzen92, Ultragothe, EDUCA33E, Cortomaltais, MMBot, Litlok, Crouchineki, Loveless, TED, Julianedm, GFDL fan, Reelax, Mutatis mutandis, Pautard, Dosto, Grasyop, Jacques Prestreau, Elapied, Pierre cb, Jmax, Manu1400, Lamiot, Tibauk, Callyope, Linan, Djibe89, Thijs !bot, GuillaumeB, Zedh, Melindaoba, MirgolthBot, Sebleouf, Aratal, Eiffele, VonTasha, Charlesladano, Jplm, Salebot, MyBot, Speculos, Isaac Sanolnacov, Jonathan1, Environnement2100, Tooony, Ptbotgourou, Cjp24, 007antoine, Xic667, Salmoneus, Alecs.bot, Vlaam, Dhatier, Hercule, Bub's, Mayayu, WikiCleanerBot, ZetudBot, Ggal, Géodigital, Afa86, Nakor, Mezek, JamousMarc, Coyote du 57, Kilith, S010xal, Katanga-frwiki, Jpjanuel, Ipipipourax, Nkout sikas, Funraiser, MerlIwBot, BotMyShinyMetalAss, Ramzan, Addbot, Als33120 et Anonyme : 41

8.2 Images

- **Fichier:CO2_pump_hg.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/CO2_pump_hg.svg *Licence* : CC BY-SA 2.5 *Contributeurs* :
- CO2_pump_hg.png *Artiste d'origine* :
- derivative work : McSush (talk)
- **Fichier:Capture_co2_avec_monoethanolamine.JPG** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Capture_co2_avec_monoethanolamine.JPG *Licence* : CC-BY-SA-3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : A. Halme
- **Fichier:Coral_fiji_moturiki.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/Coral_fiji_moturiki.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Disambig_colour.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3e/Disambig_colour.svg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Bub's
- **Fichier:EL18p-Réunion.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/EL18p-R%C3%A9union.jpg> *Licence* : CC BY-SA 2.0 fr *Contributeurs* : Transféré de fr.wikipedia à Commons. *Artiste d'origine* : The original uploader was Elapied sur Wikipedia français
- **Fichier:IPCCStockCarboneSolsVégétationFr.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/IPCCStockCarboneSolsV%C3%A9g%C3%A9tationFr.jpg> *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Lamiot
- **Fichier:LeicesterAttenboroughPanorama.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b0/LeicesterAttenboroughPanorama.jpg> *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Ncadc2004
- **Fichier:MUWO4193.JPG** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c4/MUWO4193.JPG> *Licence* : Public domain *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **Fichier:Nuvola_apps_edu_science.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/59/Nuvola_apps_edu_science.svg *Licence* : LGPL *Contributeurs* : <http://ftp.gnome.org/pub/GNOME/sources/gnome-themes-extras/0.9/gnome-themes-extras-0.9.0.tar.gz> *Artiste d'origine* : David Vignoni / ICON KING
- **Fichier:SchémaPuitsDeCarboneArntzenFr.jpg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/Sch%C3%A9maPuitsDeCarboneArntzenFr.jpg> *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* :
- Carbon_sequestration-2009-10-07.svg *Artiste d'origine* : Carbon_sequestration-2009-10-07.svg : *LeJean Hardin and Jamie Payne
- **Fichier:Stock_carbone_en_france_(estimation).jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Stock_carbone_en_france_%28estimation%29.jpg *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Lamiot
- **Fichier:Stock_carbone_mondial.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0f/Stock_carbone_mondial.jpg *Licence* : CC BY-SA 3.0 *Contributeurs* : Travail personnel *Artiste d'origine* : Lamiot
- **Fichier:View-refresh.svg** *Source* : <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/View-refresh.svg> *Licence* : Public domain *Contributeurs* : The Tango ! Desktop Project *Artiste d'origine* : The people from the Tango ! project

8.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0