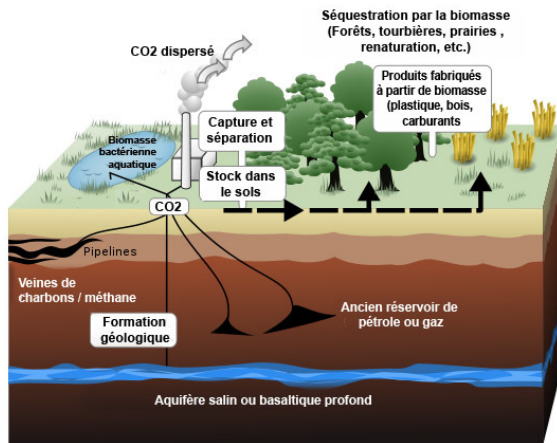


Séquestration du dioxyde de carbone

La **séquestration du dioxyde de carbone** (on parle parfois piégeage ou emprisonnement du carbone) est le stockage à long terme du **dioxyde de carbone** hors de l'atmosphère.



Représentation schématique de certains moyens de stocker le dioxyde de carbone.

1 Étapes et modes de capture - stockage

L'opération nécessite plusieurs étapes :

- **capture du dioxyde de carbone** CO_2 , elle peut se faire à plusieurs stades :
 - **stade postcombustion** (dans les fumées en aval de la combustion),
 - **stade précombustion** (décarbonatation du combustible en aval, c'est-à-dire avant la combustion. Le CO_2 est alors enlevé du carburant et stocké en amont de la combustion qui ne concernera que de l'hydrogène en n'émettant que de la vapeur d'eau et des oxydes d'azote, de soufre, etc.),
 - **capture par oxycombustion** (l'oxycombustion consiste à remplacer l'air (le comburant de la chaudière ou du moteur) par du dioxygène pur, pour n'émettre qu'un flux de dioxyde de carbone très concentré voire pur) ;
- **entreposage** intermédiaire de courte durée directement après le processus de séparation et en attente

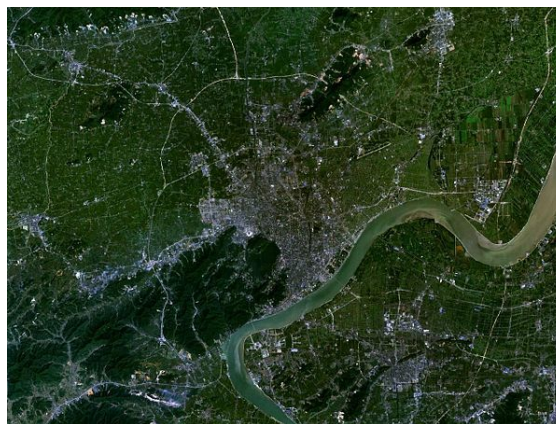
du transport et/ou de la séquestration du dioxyde de carbone récupéré ;

- **transport** : le plus souvent, le CO_2 (sous forme gazeuse ou autre) doit être transporté (par gazoduc ou bateau) de manière sécurisée quand le site de stockage est éloigné du site de capture ;
- **séquestration ou stockage géologique** : il vise à éviter tout retour rapide vers l'atmosphère ;
 - confinement ou intégration dans un puits de carbone « durable » ou dans un milieu supposé confiné (ancien gisement profond de pétrole ou de gaz, aquifère salin profond, sorption dans des veines de charbon inexploitable et étanches,
 - **piégeage par minéralisation** : par réaction du CO_2 avec un minéral silicaté comme l'olivine ou la serpentine présent dans les roches basaltiques et mafiques et transformation en carbonate de magnésium ou de fer insoluble.

L'opération se fait :

- de manière naturelle :
 - dans un **puits de carbone** comme les océans^[1] [CO_2 dissous et CO_2 fixé dans des organismes photosynthétiques (algues planctoniques, bactéries photosynthétiques)], et les prairies, forêts et cultures biologiques [dans les sols principalement (humus), mais aussi dans la couverture végétale] ;
- de manière artificielle par la séquestration par des micro-organismes élevés en réacteur et le stockage ou valorisation de la biomasse produite (sous forme de biomatériaux, combustibles, produits chimiques, bioplastiques, isolants, etc.). L'échelle industrielle n'est pas encore atteinte, mais 29 micro-organismes ont été retenus sur environ 3 000 à Niederaussem (Allemagne) par une start-up de biotechnologies Brain AG^[2], pour le compte de l'énergéticien RWE. Ces micro-organismes seraient les plus performants pour absorber de grandes quantités de CO_2 . Brain AG et RWE envisagent une commercialisation du procédé avant 2025^[3] ;
- de manière artificielle par la séquestration et le stockage du dioxyde de carbone en milieu géologique approprié :

- par injection dans une structure géologique stable et étanche comme celles des gisements pétroliers et gaziers en voie d'épuisement (avec récupération assistée d'hydrocarbures),
- par injection dans un aquifère salin, au fond des océans (avec risque d'acidification et de relâchement progressif),
- par sorption sur du charbon inexploitable dans des séquences de lits de charbon peu épais, difficilement accessibles à grande profondeur et confinés par des formations schisteuses peu perméables,
- par minéralisation du dioxyde de carbone en carbonates insolubles dans une formation basaltique : inertage par réaction du CO_2 avec certains minéraux silicatés très réactifs (cycle carbonate-silicate).



Selon une étude récente^[6], la ville de Hangzhou (Chine) a une forêt urbaine qui absorbe en moyenne 30,25 t de carbone par hectare et par an, soit une séquestration de 1,66 t de carbone par hectare et par an.

La séquestration dans des solides ou liquides synthétiques sophistiqués est nettement moins prometteuse et peu économique à très grande échelle.

- Le téréphtalate de chrome (ou « mil-101 ») a été considéré comme un candidat théorique. Il est testé en laboratoire ; le plus performant vers mi-2008 (il peut aussi stocker du méthane). Sous forme d'une poudre (verte) ; un mètre cube de ce produit peut absorber – à haute pression (50 bars) et à 25 °C – environ 400 m³ de dioxyde de carbone (25 % de plus que les matériaux antérieurement disponibles)^[4]. Cependant les quantités considérables de chrome ou de métaux lourds à engager à très grande échelle dans de tels procédés, leur relative rareté (et donc leur coût) et leur grande toxicité constituent autant de handicaps techniques et financiers probablement insurmontables, sans parler du bilan énergétique total généralement négatif et des quantités de CO_2 prohibitives produites elles aussi par la synthèse de ces matériaux. Toutefois, des matériaux de synthèse à usage réversible peuvent s'avérer des outils industriels indispensables pour les opérations de séparation, de récupération et d'entreposage de courte durée du CO_2 dans les usines de capture.

La séquestration naturelle est un enjeu important pour la protection et la stabilité du climat. La séquestration artificielle est une des pistes explorées par divers chercheurs, entreprises^[5], Agences et États pour atténuer les effets du réchauffement climatique et notamment dans le cadre du protocole de Kyoto, et on ignore les conséquences en chaînes que pourraient avoir ce type de modification de l'océan.

2 Séquestration par l'arbre urbain et les « forêts urbaines »

- En 2010, une étude^[6] a par exemple cherché à quantifier le stockage du carbone et la séquestration permise par certaines forêts urbaines au regard des émissions de carbone venant de la consommation d'énergies fossiles par les sources industrielles de Hangzhou, en Chine). Les données d'inventaire des forêts urbaines, via des équations basées sur le volume de biomasse, et le calcul de l'accroissement annuel et via une modélisation de la productivité primaire nette (PPN), des estimations de carbone stocké ont été faites.

Le carbone total stocké par les forêts urbaines de Hangzhou a ainsi été estimée à 11,74 TgC/an (soit environ 30,25 t de carbone par hectare en moyenne). La séquestration du carbone par les forêts urbaines était de 1 328 166,55 t/an, soit une séquestration par hectare de de 1,66 t de carbone par hectare et par an. Or, les émissions industrielles de CO_2 étaient pour Hangzhou de 7 TgC/an^[6].

Dans ce cas, les forêts urbaines semblent donc capables de séquestrer chaque année 18,57 % de la quantité de carbone émise par la combustion d'énergies fossiles par l'industrie locale, en stockant l'équivalent de 1,75 fois le montant de C annuelle d'énergie émise par les utilisations industrielles de la ville^[6]. Ce taux de carbone séquestré pourrait encore être amélioré par des pratiques de gestion adaptées^[6].

- Une étude^[7] publiée en 2011, du même type, mais utilisant aussi des images haute définition (Images QuickBird d'août 2006), et intégrant une évaluation de la valeur monétaire et compensatoire du carbone stocké (au regard du marché du carbone) a été fait à Shenyang (Liaoning, Chine), ville très industrial-

sée du nord de la Chine peu boisée. La surface boisée était de 101 km² (5,76 millions d'arbres et 569 arbres par hectare en moyenne), couvrant 22,28 % de la superficie totale du site d'étude (intérieur du 3^e anneau routier périphérique de Shenyang). Le statut de ces boisements était une conservation d'intérêt écologiques ou d'intérêt social^[8] sur près de 50 % de l'aire d'étude ; 10,9 ha (environ 10 % du total et avec la plus grande densité d'arbres ; 905 ± 133 tiges/ha) étaient destinés à l'exploitation du bois.

Selon les calculs des auteurs, ces forêts urbaines (anciennes ou récemment plantées aux abords du périphérique, abritant 120 espèces d'arbres et 53 espèces de buissons, les espèces les plus communes étant le peuplier du Canada (*Populus × canadensis*, Moench), le saule matsudana *Salix matsudana* (à croissance rapide), et l'orme de Sibérie *Ulmus pumila*) peuvent réellement jouer un rôle en matière de stockage de carbone, avec environ 337 000 t de carbone environ actuellement stocké par an (pour un valeur estimée de 13,88 millions de dollars), et avec un taux de séquestration du carbone de 29 000 t/an (équivalent à 1,19 million de dollars).

Le C stocké (voir carte^[9]) par cette jeune forêt périurbaine correspond à 3,02 % des émissions annuelles de C provenant de la combustion de combustibles fossiles. La séquestration du carbone pourrait ainsi compenser 0,26 % des émissions annuelles de Carbone de Shenyang. L'étude montre aussi que le stockage de C et le taux de séquestration varient fortement selon le type de forêt urbaine (essences, sol, composition en espèces, structure forestière et classes d'âge), et qu'il pourrait être amélioré par une gestion adaptée.

- En zone subtropical de Miami-Dade et de Gainesville aux États-Unis, la forêt urbaine a aussi été étudiée de ce point de vue^[10]. À Gainesville, la forêt urbaine était plus dense et stockait et séquestrait plus de carbone qu'à Miami-Dade, en raison des conditions environnementales mais aussi du mode d'urbanisation. Les quartiers plantés de boisement de pins et chênes naturels, ainsi que les mangroves et des peuplements d'arbres envahissant ont été les plus aptes à séquestrer le Carbone du CO₂. Les émissions urbaines ne sont toutefois que faiblement compensées (3,4 % à Gainesville et 1,8 % à Miami-Dade). En outre, la conversion des zones urbaines encore disponibles en forêt urbaine ne diminuerait pas sensiblement les émissions de CO₂. La séquestration du CO₂ par les arbres était pour les années 2010 comparable à mis en œuvre des politiques de réduction de CO₂, mais les auteurs considèrent qu'au regard d'objectifs à long terme, des multiples services écosystémiques rendus par les boisements, des coûts, des besoins communautaires, la préservation des forêts existantes doit être reconsidérée en intégrant leur valeur pour l'adaptation au changement climatique et

la lutte contre le dérèglement climatique et pour la restauration ou conservation d'autres services écosystémiques^[11], dont l'amélioration de la qualité de l'air^[12] ou la dépollution de certains sols^[13].

- Le Département des forêts de l'USDA a collecté^[14] des données pour 10 grandes villes des États-Unis et pour le couvert forestier nord américain. Selon ces sources, les arbres urbains USA stockeraient actuellement et provisoirement aux États-Unis environ 700 millions de tonnes de carbone (soit un service équivalent à 14,3 milliards de dollars de valeur au « prix du carbone » de 2010, avec un bilan brut de séquestration du carbone de 22,8 millions tC/an (soit un service écosystémique correspondant à environ 460 millions de dollars/an).

Ce stockage urbain du carbone varie considérablement selon les villes ; de 1,2 million de t/an à New York, à 19 300 tC à Jersey City (New Jersey). En moyenne, ce stockage de carbone a été estimé aux États-Unis (pour le début des années 2000) à 25,1 t de carbone par hectare (comparativement à 53,5 tC/ha dans les peuplements forestiers).

Article détaillé : Forêt urbaine.

3 Séquestration artificielle

Le dioxyde de carbone pourrait théoriquement être massivement enfoui, par des méthodes qu'il faudra rendre sécurisée sur le très long terme.

Trois lieux et modes de séquestration sont considérés :

1. le substrat géologique rocheux (pour une capacité estimée d'environ 2 000 Gt de CO₂, selon le GIEC qui estime qu'avec des technologies à développer et valider, et une surveillance appropriée, plus de 99 % du CO₂ injecté sur 1000 ans pourrait ainsi être emprisonné pour plusieurs millions d'années), par injection *via* des puits sous forme gazeuse supercritique dans des roches perméables (aquifères). Les technologies dérivent de l'industrie pétrolière (caractérisation de réservoirs potentiels, forages, gazoduc, compression) qui se positionne sur ce nouveau marché lui permettant de limiter les émissions en CO₂ de son exploitation du carbone fossile. Le risque de remontée de CO₂, massive depuis un puits mal étanchéifié, ou plus diffuse, ou de diffusion du CO₂ dans les aquifères supérieurs, doit être maîtrisé ;
2. les grands fonds océaniques (stockage provisoire et incertain, et à haut risque pour la biodiversité des grands fonds) ;

3. l'inertage sous forme de carbonates minéraux reconstitués (solution copiant la nature, mais coûteuse en énergie).

3.1 Séquestration dans le substrat géologique rocheux

Article détaillé : Séquestration géologique du dioxyde de carbone.

Si des solutions géotechniques étaient validées et efficaces, selon le GIEC (en 2005), cette solution pourrait potentiellement répondre de 10 % à 55 % de l'effort total de réduction à envisager pour le siècle 2000-2100, mais leur fiabilité à long et très long terme reste discutée, notamment face au risque sismique.

- *Dans des gisements d'hydrocarbures étanches* : les gisements de gaz naturel et de pétrole sont les candidats les plus fréquemment cités pour y séquestrer du CO₂ en raison de leur étanchéité et de leur stabilité à l'échelle des temps géologiques. L'injection de CO₂ dans des gisements pétroliers étant d'ailleurs déjà pratiquée depuis des décennies (surtout au Texas), à des fins de récupération assistée : Puissant solvant, le CO₂ supercritique aide à récupérer une partie du pétrole résiduel de gisements difficiles ou en baisse de production. Néanmoins, la grande majorité des projets de récupération assistée à base de CO₂ (CO₂-EOR, pour (en) enhanced oil recovery) entrepris jusqu'à présent utilisent du CO₂ issu de sources naturelles.
- *Dans des veines de charbon* : le méthane de veines de charbon non exploitées pourrait être extrait et remplacé par du CO₂, la récupération du méthane finançant le stockage du CO₂. Réinjecter du gaz dans les pores du charbon est théoriquement possible si les couches ne se sont pas tassées après extraction. Des pilotes expérimentaux testent cette solution, qui pourrait éventuellement être associée à la gazéification du charbon, si des méthodes probantes et sécurisées étaient développées.
- *Les aquifères salins* sont géologiquement pour partie comparables aux gisements d'hydrocarbures, mais avec une capacité bien plus grande. Plusieurs mécanismes de piégeage semblent pouvoir y immobiliser le CO₂, avec moins de risque de fuite que dans les bassins houillers ou dans certains champs pétrolifères criblés de puits et parfois affectés par des affaissements et donc des fissures dans les terrains surincombants.
- *Autres milieux* : le stockage géologique entre des strates de schistes serait aussi considéré. Les solutions aujourd'hui envisagées visent quasi-toujours

des bassins sédimentaires. Toutefois, dans des régions volcaniques, les formations de basalte pourraient aussi servir à stocker du CO₂ par réaction du CO₂ avec des silicates réactifs (piégeage minéral).

3.2 Stockage dans les fonds océaniques

Les trois approches les plus citées sont :

- *ensemencement des horizons marins superficielles par du fer (facteur limitant)* pour doper la croissance de plancton, dont la nécromasse piégerait le carbone. En 1990 l'océanographe John Martin dans la revue scientifique *Nature* montrait que le fer naturellement présent dans l'eau dopait la croissance du phytoplancton. Le rôle du fer bio-disponible et bio-assimilable a été confirmé par plusieurs études, mais sans que l'on puisse encore savoir si un forçage anthropique par ajout de fer pourrait efficacement et durablement piéger plus de carbone^[15]. L'idée a germé qu'on pourrait hors de zones déjà eutrophes ou dystrophes « fertiliser » artificiellement la mer pour accélérer sa fonction de « pompe biologique à carbone » (qui absorbe de 10 à 20 milliards de tonnes de carbone par an dans les sédiments marins). De 2002 à 2005, 12 fertilisations artificielles ont été testées, mais seules trois d'entre elles ont pu faire la preuve qu'il y a réellement eu séquestration de carbone, souligne le biogéochimiste Philip Boyd^[16], et on ignore ce qu'il est advenu à long terme du carbone. Une des difficultés semblent être que le fer devrait être bio-assimilable pour le plancton et très largement réparti. D'autre part les boucles de rétro-action des écosystèmes marins sont encore mal cernées ;
- *dissolution par injection de CO₂ dans le bas de la colonne d'eau de mer* (à au moins 1 000 m de profondeur), avec le risque de dispersion de ce carbone sous forme d'acide carbonique, et d'impacts mal maîtrisables liés à l'acidification de l'eau, ce pourquoi certains ont proposé une *injection profonde de CO₂*, directement dans des fosses marines (à 3 000 m et plus), où on espère que le CO₂ formerait durant un certain temps un lac plus lourd que l'eau de mer, ralentissant sa dissolution du CO₂ dans l'environnement ;
- *conversion de CO₂ en bicarbonates, hydrates ou matière organique* évoluant vers une nécromasse riche en carbone sédimentant.

3.3 Stockage minéral

Le stockage sous forme stable et inertée (par exemple de carbonates) est la solution évaluée la plus sûre et durable, mais pour le moment la plus coûteuse et non techniquement maîtrisée à grande échelle.

4 Impacts environnementaux

Ils semblent tous problématiques ou potentiellement négatifs, bien que difficiles à modéliser faute de connaissance suffisante sur l'écologie des grands fonds et sur le fonctionnement écosystémique de l'océan mondial (en particulier les très nombreux virus marins qui « contrôlent » et limitent la croissance du plancton et les effets de la méthanisation). Le CO₂ forme avec l'eau de l'acide carbonique (H₂CO₃) qui tuerait les formes de vies des zones où il serait massivement injecté. S'il diffusait dans la colonne d'eau, il attaquerait aussi certaines formes de vie planctonique, les coraux et roches calcaires qui sont un puits de carbone. Les effets de l'augmentation du CO₂ sur la vie benthique, bathypélagique et abyssalopélagique ou hadopélagique, en particulier de l'acidification sont encore peu étudiés et très mal compris. En particulier le dopage de l'activité planctonique peut se traduire par des zones marines mortes, une méthanisation accrue dans les sédiments et/ou la constitution d'hydrates de méthane dont le comportement en cas de réchauffement est encore inconnu, mais qui s'ils étaient brutalement relâchés accéléreraient le réchauffement climatique.

La vie semble clairsemée dans les grands fonds, mais elle est densément présente autour des sources chaudes, et de manière générale elle semble jouer un rôle majeur dans les processus de sédimentation et le cycle du carbone.

Le temps moyen de circulation de l'eau des grands fonds vers la surface est estimée à 1 600 ans environ, mais avec de grandes variations possibles selon les lieux, les courants et l'activité volcanique sous-marine (l'effet d'un tsunami sous-marin sur un stockage en profondeur, ou d'un tremblement de terre sur les hydrates de méthane pourrait être important). Si du méthane gagnait brutalement et massivement la surface et l'atmosphère, il y accélérerait fortement le réchauffement, d'autant plus vite qu'il aurait au passage dégradé les puits biologiques océaniques de carbone (Cf Phénomène de zone morte).

5 Coûts

Les coûts sont évalués à 40 à 80 dollars US la tonne (à la valeur de 2002 de l'USD) pour une séquestration de CO₂ liquide, à partir de la centrale thermique, incluant le transport et la décharge dans les océans. En France, selon les évaluations de Gaz de France, la capture est la partie la plus coûteuse de l'opération (40 à 60 € la tonne de CO₂), le coût du transport étant de 2 à 20 €/t de CO₂, le stockage ne comptant que pour 0,5 et 10 €/t CO₂, pour un total compris entre 43 et 90 €/t de CO₂. L'Industrie des hydrocarbures estime elle-même que seuls environ 10 % des émissions mondiales pourraient faire l'objet d'un stockage à des coûts raisonnables (à partir des grandes sources d'émissions, situées à une relative proximité de sites potentiels de stockage)^[17].

Selon le PDG de Veolia Environnement, la capture et séquestration du carbone représenteraient un surcoût de 30 % à 40 % de l'électricité produite, ce qui n'a rien d'excessif en comparaison des surcoûts de l'éolien et du solaire. Pour financer les investissements nécessaires, une taxation du CO₂ d'au moins 40 €/tonne serait nécessaire, alors que le marché actuel (2014) tourne autour de 7 à 8 €/t^[18].

Le 12 janvier 2015, quatre grands énergéticiens européens : le français EDF, l'allemand RWE, le suédois Vattenfall et l'espagnol Gas Natural Fenosa se sont retirés du projet européen de développement des techniques de captage et de stockage du carbone (CCS) baptisé « plate-forme zéro émission » (ZEP), qui conseille la Commission européenne sur les techniques de captage et de stockage du carbone ; ils estiment qu'ils ne disposent pas actuellement du cadre économique nécessaire en Europe pour faire des CCS une technologie attractive pour l'investissement^[19].

6 Autres solutions de séquestration artificielle

- Il a été proposé d'injecter dans les fonds océaniques une grande quantité de biomasse végétale dans les zones où des courants plongent vers les grands fonds, par exemple face à l'estuaire du Mississippi, au golfe du Mexique ou au Nil, mais on trouve déjà des zones mortes sur ces sites et le risque de conséquences écologiques inattendues est très important.
- Le stockage minéral inerte, via la production de carbonates - si elle semble sûre - est aussi financièrement exorbitante et coûteuse en énergie (selon le GIEC (2005), il faudrait avec les technologies actuelles augmenter de 60 à 180 % de la consommation de carburant des centrales thermiques, augmentation ne pouvant qu'être partiellement compensée par des technologies plus efficaces).
- Des méthodes utilisant la catalyse ou inspirées des processus biochimiques naturels sont à l'étude, dont celui dit de la boucle chimique.

7 Alternatives

Développer les puits de séquestration naturelle, que ce soit les forêts, les prairies, les cultures biologiques, la réimplantation de haies, voire en ville, la re-végétalisation partielle de zones bitumées, comme les grands parkings, les trottoirs (joints verts entre des dalles) ou les toits végétalisés.

Ces aménagements en ville peuvent sembler anecdotiques, mais, en plus de séquestrer du carbone, ils participent aussi à la régulation thermique par



l'évapotranspiration des plantes et à la régulation de l'eau de pluie, réduisant les risques et l'importance des inondations.

Développer l'énergie solaire et éolienne, et mieux valoriser le biogaz sont des solutions évoquées par le rapport de Bataille et Birraux^[17].

8 Notes et références

- [1] « Stockage du CO₂ dans l'océan : de nouvelles données à prendre en compte dans les modèles de prévision du changement climatique », *Communiqué de presse CNRS*, 4 février 2013 Voir
- [2] Présentation de Brain AG (entreprise de biotechnologies)
- [3] BE Allemagne n°554 (2012-01-11); Ambassade de France en Allemagne / ADIT
- [4] Source de l'article : Langmuir, prépublication en ligne, 2008, reprise par le journal *Pour la Science*, Juillet 2008
- [5] ex. : la société américaine Planktos espérait fin 2007 avec 5 euros en épanchant du fer dans l'océan piéger 1 t de carbone (théoriquement vendable 70 euros sur le marché), mais l'efficacité du processus n'a pas été à la hauteur (30 à 50 fois moins que prévu par l'entreprise selon un reportage de *Libération* intitulé « Bras de fer avec la mer », du 8 janvier 2008 Voir)
- [6] Min Zhao, Zheng-hong Kong, Francisco J. Escobedo et Jun Gao *Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China*, *Journal of Environmental Management*, volume 91, issue 4, mars-avril 2010, pages 807-813 DOI :10.1016/j.jenvman.2009.10.010 (Résumé)
- [7] Changfu Liu, et Xiaoma Li, *Carbon storage and sequestration by urban forests in Shenyang, China*; *Urban Forestry & Urban Greening* (Version corrigée, mise en ligne le 2 avril 2011); DOI :10.1016/j.ufug.2011.03.002
- [8] « *Public Welfare Forest* » dans le texte.
- [9] Carte de séquestration du carbone à Shenyang (à l'intérieur du 3ème "Ring" périphérique)
- [10] Francisco Escobedo, Sebastian Varela, Min Zhao, John E. Wagner et Wayne Zipperer, *Analyzing the efficacy of subtropical urban forests in offsetting carbon emissions from cities*; *Environmental Science & Policy*, vol. 13, issue 5, août 2010, p. 362-372, DOI :10.1016/j.envsci.2010.03.009 (Résumé)
- [11] Robert F. Young, *Managing municipal green space for ecosystem services*, *Urban Forestry & Urban Greening*, volume 9, issue 4, 2010, pages 313-321 DOI :10.1016/j.ufug.2010.06.007, 15 septembre 2010. (Résumé)
- [12] David J. Nowak, *Institutionalizing urban forestry as a "biotechnology" to improve environmental quality*; *Urban Forestry & Urban Greening*, volume 5, issue 2, 15 août 2006, pages 93-100 (Résumé)
- [13] Francisco J. Escobedo, Timm Kroeger, John E. Wagner, *Urban forests and pollution mitigation : Analyzing ecosystem services and disservices*; *Environmental Pollution*, volume 159, issues 8-9, août-septembre 2011, pages 2078-2087 (Résumé)
- [14] David J. Nowak et Daniel E. Crane, *Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA*, *Environmental Pollution*, volume 116, issue 3, mars 2002, pages 381-389, DOI :10.1016/S0269-7491(01)00214-7 (Résumé)
- [15] Blain S., Quéguiner, B., Armand, L.K., Belviso, S., Bombled, B., Bopp, L., Bowie, A., Brunet, C., Brussaard, C., Carlotti, F., Christaki, U., Shreeve R.S., Corbière, A., Durand, I., Ebersbach, F. Fuda, J.L., Garcia, N., Gerringa, L., Griffiths, B., Guigue, C., Guillermin, C., Jacquet, S., Jeandel, C., Laan, P., Lefèvre, D., Lomonaco, C., Malits, A., Mosseri, J., Obernosterer, I., Park, H.Y., Picherl, M., Pondaven, P., Remenyi, T., Sandroni, V., Sarthou, G., Savoye, N., Scouarnec, L., SouhautM., Thuiller, D., Timmermans, K., Trull, T., Uitz, J., Van-Beek, P., Veldhuis, M., Vincent, D., Viollier, E., Vong, L., Wagener, T., 2007. *Impact Of Natural Iron Fertilisation On Carbon Sequestration In The Southern Ocean*; *Nature*, vol. 446, DOI :10.1038/nature05700, 1070-1074
- [16] Institut de recherche sur l'eau et l'atmosphère, et Université d'Ottago (Nouvelle-Zélande, Page personnelle, avec biblio)
- [17] SÉNAT; OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUE. RAPPORT : Les nouvelles technologies de l'Énergie et la Séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques; Par M. Christian BATAILLE et M. Claude BIRRAUX, séance du 15 mars 2006 ([PDF], 398 p.), voir p. 20/398
- [18] Antoine Frérot : « L'Europe a beaucoup d'atouts pour développer les bonnes solutions », *Les Échos*, 23 septembre 2014
- [19] Stockage du CO₂ : les énergéticiens se retirent d'un projet européen, *Les Échos*, 20 janvier 2015.

9 Articles connexes

- Effet de serre
- Puits de carbone
- Pétrole et gaz naturel en Arctique : Snøhvit
- Snøhvit
- Pompe biologique
-  Portail de l'énergie
-  Portail de l'environnement

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

10.1 Texte

- **Séquestration du dioxyde de carbone** *Source* : http://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9questration_du_dioxyde_de_carbone?oldid=111183550 *Contributeurs* : VIGNERON, Phe-bot, Chninkel, Eek, Orel'jan, Stéphane33, Zetud, Gzen92, Loveless, Pautard, Dosto, Lamiot, Chaoborus, RémiH, Zedh, Eiffele, VonTasha, Benoit Rochon, WilfriedC, Environnement2100, Segognat, Stephagne, Cjp24, Gz260, Salmoneus, Warinhari, Vlaam, Dhatier, HERMAPHRODITE, Superjuju10, Manoillon, HerculeBot, ZetudBot, Shinkolobwe, ABACA, DSisyphBot, Cantons-de-l'Est, Abracadabra, Coyote du 57, Ephemthe, Jules78120, Mthinque63, Jpjanuel, Nkoutikas, MerllwBot, Bertol, Pierre Zstein, 45Brya et Anonyme : 13

10.2 Images

- **Fichier:Crystal_energy.svg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/Crystal_energy.svg *Licence* : LGPL *Contributeurs* : Own work conversion of Image:Crystal_128_energy.png *Artiste d'origine* : Dhatfield
- **Fichier:Hangzhou_120.16322E_30.28125N.jpg** *Source* : http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2b/Hangzhou_120.16322E_30.28125N.jpg *Licence* : Public domain *Contributeurs* : ? *Artiste d'origine* : ?
- **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: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

10.3 Licence du contenu

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0