

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

Séquestration du dioxyde de carbone

Présenté par : Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

Dr RAVELOJAONA Dorient (2)

Enseignant Chercheur, Maître de Conférences à l'Université de Toamasina

Tél : 032 11 982 33/ 032 45 390 20

e-mail : velojaona@yahoo.com

Monsieur ANDRIANJAFIMANANA Fenosoa Eric (3)

Doctorant à l'EDGVM/Université de Mahajanga

e-mail : fenseric85@yahoo.com

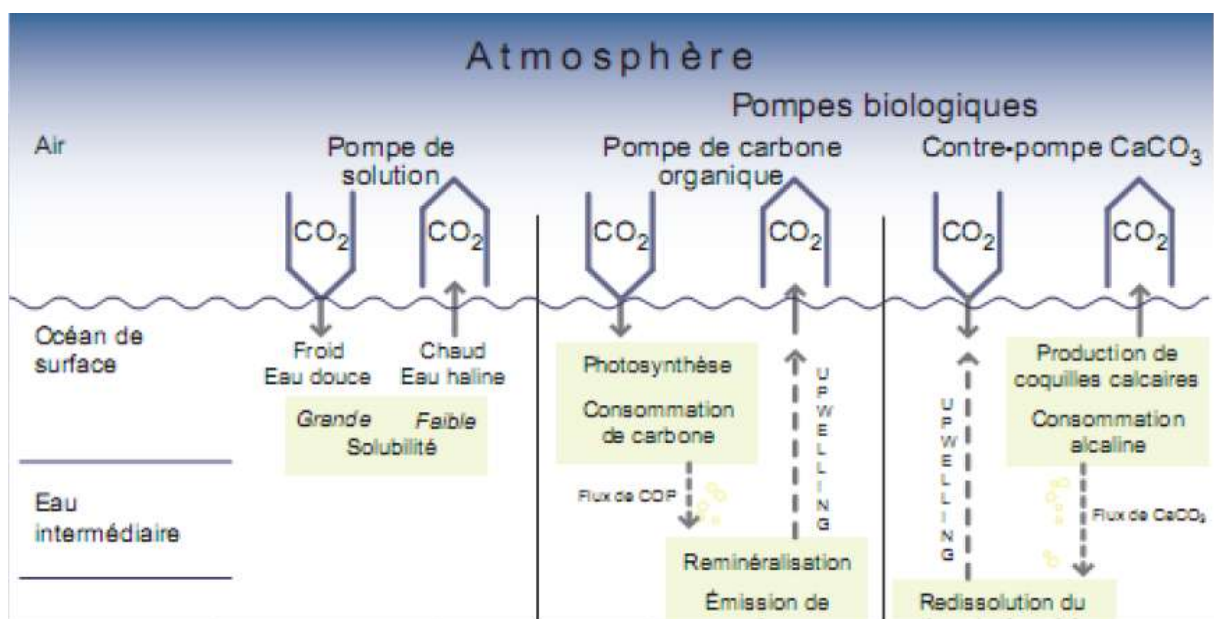
Tél : 033 17 001 56

Madame RAZAFY Béatrice (4)

Doctorante à l'ESSA Ankatso, Université d'Antananarivo

e-mail : razafybeatrice69@gmail.com

Tél : 032 78 719 06



Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

RÉSUMÉ

La séquestration du dioxyde de carbone, appelée plus simplement piégeage du carbone ou séquestration du carbone est le stockage à long terme du dioxyde de carbone hors de l'atmosphère. C'est l'une des techniques et mesures envisagées pour atteindre les engagements climatiques et énergétiques de la communauté internationale (Accord de Paris). Pour cela, selon le scénario « technologies propres » (CTS) de l'Agence internationale de l'énergie il faut stocker dans le monde 107 gigatonnes de dioxyde de carbone (Gt CO₂) entre 2015 et 2060^[1].

Mots clés : dioxyde, carbone, séquestration, piégeage, énergie.

ABSTRACT

Carbon dioxide sequestration, more simply called carbon sequestration or carbon sequestration, is the long-term storage of carbon dioxide outside the atmosphere. This is one of the techniques and measures envisaged to achieve the climate and energy commitments of the international community (Paris Agreement). To do this, under the International Energy Agency's "clean technologies" (CTS) scenario, 107 gigatonnes of carbon dioxide (GT CO₂) must be stored worldwide between 2015 and 2060.

Keywords: carbon dioxide, sequestration, trapping, energy.

INTRODUCTION

La séquestration du dioxyde de carbone est le stockage du CO₂ hors de l'atmosphère. Près de la moitié des émissions anthropiques est naturellement extraite de l'atmosphère par le biais des équilibres du cycle de carbone, s'intégrant aux stocks de biomasse et de roches carbonatées. Une solution consisterait donc à mobiliser plus intensivement ce cycle, notamment en augmentant la quantité de biomasse sur terre ou dans les océans.

Cependant, cette option connaît des limites. En revanche, la séquestration « artificielle » du CO₂ dans le sous-sol paraît à première vue être une solution à l'échelle des enjeux. Qu'en est-il réellement ?

Le carbone est naturellement stocké par les végétaux à travers le processus de photosynthèse (absorption par les végétaux du CO₂ et rejet de dioxygène). A la surface terrestre, ce sont les forêts qui constituent les principaux « puits de carbone ». Le reboisement représente

donc un moyen de lutter contre le réchauffement climatique.

I. MATÉRIELS ET MÉTHODES

I.1. MATÉRIELS

I.1.1 Emissions anthropiques

Pour compenser les émissions anthropiques, il faudrait planter de manière pérenne 50 millions d'ha chaque année. Impensable, lorsque l'on considère les difficultés actuelles rencontrées dans la lutte contre les incendies, et le déboisement des forêts tropicales primaires (17 millions d'ha par an).

I.1.2. Océans

Les océans sont le principal lieu de stockage naturel du carbone et ils ont ainsi emmagasiné environ 500 des 1 300 Gt de CO₂ rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines au cours des 200 dernières années. La plupart du CO₂ est actuellement emmagasiné dans la couche supérieure de l'océan, sous forme de phytoplancton.

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

I.1.3. Phytoplancton

Il a été proposé d'injecter le dioxyde de carbone au fond des océans afin qu'il s'y dissolve. Mais d'une part la concentration du CO₂ et la hausse de l'acidité induite pourraient avoir des conséquences néfastes pour les organismes marins, d'autre part cette option relève d'une vision de court terme : les équilibres naturels provoqueront à l'échelle du siècle un rejet d'une partie du CO₂ ainsi dissout dans l'atmosphère.

I.2. MÉTHODES

I.2.1. Séquestration océanique ou Fertilisation

Cette méthode récente est issue de la découverte de zones importantes de l'océan (20 % environ) dans lesquelles la rareté du fer constitue le principal facteur limitant la croissance des organismes photosynthétiques.

Epandre à la surface des océans du fer permettrait donc de stimuler

l'absorption de CO₂ par les phytoplanctons. Mais pour obtenir un effet à l'échelle des émissions anthropiques, il faudrait mobiliser l'ensemble des surfaces océaniques concernées en leur apportant une quantité de fer beaucoup plus importante que celle pour lesquels les effets ont été évalués. Un bouleversement des équilibres écologiques est à craindre, ce qui fait de la fertilisation l'une des techniques les plus controversées.

I.2.2. Enfouissement du CO₂

L'enfouissement du CO₂ est aujourd'hui l'option la plus sérieusement étudiée. De nombreux scientifiques s'accordent pour dire que la technique du piégeage et du stockage du CO₂ (PSC) est l'une des principales options de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES). Il s'agit selon la terminologie du GIEC d'une mesure d'« atténuation » : si elle était

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

mise en œuvre.

II. RÉSULTATS

II.1. Coût de la stabilisation de concentration

Le coût de la stabilisation de la concentration des GES dans

par les activités humaines.

II.2. Piégeage et compression du CO₂

Les études en cours révèlent que dans un système complètement intègre comprenant le piégeage du CO₂, son transport, son stockage et la surveillance du site, ce sont le piégeage et la compression du CO₂ qui constitueraient les étapes les plus coûteuses. Le piégeage suppose de purifier le CO₂ émis, ce qui est plus aisé dans le cas d'une centralisation des flux.

II.2.1. PSC

Le PSC n'est envisagé à l'heure actuelle que pour les centrales électriques fonctionnant au gaz, à la biomasse et au charbon, ou pour les usines de production

l'atmosphère serait réduit de 30 %, et en 2050, la quantité piégée pourrait représenter 21 % à 45 % du CO₂ total émis

de ciment, la séquestration pour les autres activités industrielles étant beaucoup plus coûteuse. A ces coûts de piégeage s'ajoutent ceux du stockage du CO₂.

II.2.2. Etat du CO₂

Le CO₂ sous forme de gaz ou de liquide peut être injecté dans des formations géologiques profondes, telles que les formations salines ou les gisements pétroliers ou gaziers en voie d'épuisement.

II.2.3. Capacités de stockage

Les capacités de stockage sont alors à la mesure des matières fossiles extraites des profondeurs depuis deux décennies. Mais une grande vigilance est nécessaire afin d'éviter les risques de fuites de CO₂. Un autre mode de stockage consiste à transformer le CO₂ en matière solide (le calcaire par

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

exemple), à travers la combinaison à certains minéraux. Ce procédé constitue toutefois l'option la plus coûteuse.

II.2.2. Séquestration du dioxyde de carbone

La séquestration du dioxyde de carbone, appelée plus simplement piégeage du carbone ou séquestration du carbone (on parle parfois de

propres » (CTS) de l'Agence internationale de l'énergie il faut stocker dans le monde 107 gigatonnes de dioxyde de carbone (Gt CO₂) entre 2015 et 2060^[1].

III. DISCUSSIONS ET SOLUTIONS

III.1. DISCUSSIONS

III.1.1. PSC

La forte consommation d'énergie (entre 10 % et 40 % de la capacité d'une centrale électrique) du PSC est également problématique: cette perte énergétique impliquerait la construction d'autres

piégeage ou d'emprisonnement, après une étape de captage et éventuel transport) est le stockage à long terme du dioxyde de carbone hors de l'atmosphère. C'est l'une des techniques et mesures envisagées pour atteindre les engagements climatiques et énergétiques de la communauté internationale (Accord de Paris).

Quelles que soient les techniques envisagées, le PSC soulève plusieurs critiques. C'est avant tout une technologie de moyen voire de long terme : le GIEC prévoit la mise en route à grande échelle de cette technologie pour 2030. Or toujours selon ses prévisions, des efforts massifs de réduction des émissions doivent être entrepris avant 2015.

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

centrales (1 pour 4), ce qui augmenterait d'autant l'effort nécessaire de stockage... Une utilisation massive de cette technique pourrait provoquer de fortes hausses du prix de l'électricité (entre + 21 % et + 91 %). Enfin,

moyens de stocker le dioxyde de carbone.

La séquestration du dioxyde de carbone, appelée plus simplement piégeage du carbone ou séquestration du carbone (on parle parfois de piégeage ou d'emprisonnement, après une étape de captage et éventuel transport) est le stockage à long terme du dioxyde de carbone hors de l'atmosphère. C'est l'une des

3.1.2. Modes de séquestration



la question de la gestion à long terme des réservoirs de CO₂ se pose, avec le risque de fuites diffuses peu détectables, ou de fuites localisées constituant une menace pour la sécurité

techniques et mesures envisagées pour atteindre les engagements climatiques et énergétiques de la communauté internationale (Accord de Paris). Pour cela, selon le scénario « technologies propres » (CTS) de l'Agence internationale de l'énergie il faut stocker dans le monde 107 gigatonnes de dioxyde de carbone (Gt CO₂) entre 2015 et 2060.

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

Bio-séquestration par les forêts.

On distingue deux grands modes de séquestration :

- la séquestration industrielle (ou artificielle), qui implique différentes techniques telles que le stockage géologique de carbone, qui consiste à capter le CO₂ industriel à son point d'émission (centrale électrique, cimenteries, aciérie ...), à le concentrer et le transporter vers un site géologique adéquat pour son stockage ;
- la séquestration biologique (naturelle), appelée bio-séquestration qui implique des processus biologiques permettant de capter et stocker le CO₂ atmosphérique par le biais des équilibres du cycle du carbone. Dans les temps passés, elle est responsable de la formation des vastes gisements de charbon et de pétrole qui sont actuellement brûlés.

La séquestration naturelle s'appuie sur la capacité des organismes vivants à synthétiser des molécules organiques à partir de CO₂ atmosphérique ou en recyclant de la matière organique préexistante, et à stocker cette matière (puits de carbone). Ce processus, complémentaire de la séquestration géologique, est adapté aux sources d'émissions diffuses (transports, habitat, etc.) 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, agences et États pour atténuer les effets du réchauffement climatique et notamment dans le cadre du protocole de Kyoto.

3.1.3. Séquestration naturelle ou bio-séquestration

La séquestration naturelle se fait dans un puits de carbone comme les océans^[3] (CO₂ dissous et CO₂ fixé dans des organismes photosynthétiques : algues planctoniques, bactéries photosynthétiques), les prairies, les forêts et cultures biologiques, dans les sols principalement (humus), mais aussi dans la couverture végétale (voir initiative internationale connue sous le nom de 4p1000).

3.1.3.1. Séquestration du carbone dans les sols

Les pratiques culturales sans labour, en présence de paillage, visent à maintenir la séquestration de matière organique riche en carbone dans le sol. Cette pratique empêche l'exposition du sol à l'oxygène atmosphérique, la lixiviation et l'érosion. L'arrêt du labour encouragerait la prédation des fourmis sur les termites mangeurs de bois, permettrait aux mauvaises herbes de régénérer le sol et aiderait à ralentir les ruissellements sur les terres.

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

Le sol stocke plus de carbone terrestre que la somme des puits de carbone atmosphérique et végétal. La plus grande densité de ce carbone séquestré se trouve dans les sols des prairies^{[5],[6]}.

3.1.3.2. Séquestration du carbone par les océans

Le carbone bleu fait référence au dioxyde de carbone retiré de l'atmosphère par les écosystèmes océaniques côtiers du monde, principalement les mangroves, les marais salants, les herbiers marins et potentiellement les macroalgues, par la croissance des plantes et l'accumulation et l'enfouissement de matière organique dans le sol.

3.1.3.3. Séquestration du carbone par les forêts



Le microbiote du sol contribue fortement à la séquestration du carbone dans la végétation et les sols des forêts qui couvrent près d'un tiers de la surface émergée de la planète. La végétation des forêts stocke près de la moitié du réservoir de carbone terrestre et leurs sols 11 %^[9], ces deux réservoirs piégeant annuellement 30 % des émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion des combustibles fossiles^[10].

Les forêts du monde contiennent plus de carbone que l'ensemble de l'atmosphère, « avec 650 milliards de tonnes de piégé, dont 44 pour cent dans la biomasse, 11 pour cent dans le bois mort et la litière, et 45 pour cent

Cette section est vide, insuffisamment détaillée dans le sol. Si la gestion durable, la plantation et la réhabilitation des forêts peuvent conserver ou accroître les stocks de carbone forestier, la déforestation, la dégradation des forêts (en) et une gestion forestière insuffisante ont pour effet de les réduire. Cette baisse est principalement imputable à la réduction de la superficie forestière mondiale et s'est produite en dépit de l'augmentation du matériel sur pied par hectare dans certaines régions. »

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



Selon une étude récente, la ville de Hangzhou (Chine) a une forêt urbaine

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

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.

Les végétaux présents dans le milieu urbain contribuent aussi à piéger du dioxyde de carbone. Différentes études ont été menées pour mesurer la quantité de gaz concernée, notamment en Chine et aux États-Unis.

En 2010, une étude 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 estimé 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 1,66 t de carbone par hectare et par an. Or, les émissions industrielles de CO₂ étaient pour Hangzhou de 7 TgC/an.

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. Ce taux de carbone séquestré pourrait encore être amélioré par des pratiques de gestion adaptées.

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 xcanadensis*, 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 une 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 carbone stocké par la forêt périurbaine correspond à 3,02 % des émissions annuelles de carbone 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 carbone 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.

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

3.1.3.5. Amélioration de la photosynthèse

L'efficacité photosynthétique des plantes peut être augmentée en modifiant leurs gènes Rubisco pour augmenter leur activité catalytique, afin d'accroître la bio-séquestration du carbone. Un des domaines de recherche consiste à augmenter la proportion de plantes photosynthétiques à fixation du carbone en C₄. Les plantes C₄ représentent environ 5 % de la biomasse végétale sur terre et 1 % des espèces végétales connues, mais elles réalisent environ 30 % de la fixation terrestre du carbone. Dans les feuilles des plantes C₃, les photons subissent une photosynthèse accompagnée d'une photo-respiration qui protège la photosynthèse de la photo-inhibition, mais « gaspille » 50 % du carbone potentiellement fixé. La voie photosynthétique C₄ réduit cependant la photo-respiration. Une piste envisagée par certains chercheurs consiste à tenter de modifier génétiquement les cultures vivrières de base C₃ (comme le blé, l'orge, le soja, les pommes de terre et le riz) avec l'appareil photosynthétique « turbo » des plantes C₄.

3.1.3.6. Séquestration artificielle

Le dioxyde de carbone pourrait théoriquement être massivement enfoui, par des méthodes qu'il faudra rendre sécurisée sur le très long terme. On considère trois principaux lieux et modes de séquestration :

a-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 1 000 ans pourrait ainsi être emprisonné pour plusieurs millions d'années), par injection *via* des puits sous forme de fluide 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 ;

b-les grands fonds océaniques (stockage provisoire et incertain, et à haut risque pour la biodiversité des grands fonds) ;

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

3.1.3.7. Étapes de capture avant le stockage

Avant la phase de séquestration à proprement parler, une étape de captage (et éventuellement de transport) est nécessaire :

a-La capture du dioxyde de carbone CO₂ peut se faire selon plusieurs techniques :

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

- en *postcombustion* (capture dans les fumées en aval de la combustion),
- en *précombustion* (décarbonatation du combustible en amont, c'est-à-dire avant la combustion. Le carbone 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.),
- en *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) ;
- Capture dans l'air ambiant par adsorption ;

b- *L'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 ;

c- *Le transport* : le plus souvent, le CO₂ (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 ;

3.1.3.8. Séquestration dans le substrat géologique rocheux

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.
- 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).

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

Le CO₂ peut alors réagir avec le basalte et les nombreuses communautés microbiennes qui y sont présentes

3.1.3.9. Stockage dans les fonds océaniques

Plusieurs approches sont proposées pour séquestrer du CO₂ en mer ou dans les abysses :

a-ensemencement d'horizons marins superficiels par du fer, car le fer est un facteur limitant pour la croissance du plancton (dont la masse morte piégerait alors 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 (quand il est 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. 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 bio-géochimiste Philip Boyd, et on ignore ce qu'il est advenu à long terme du carbone. Une des difficultés semble être que le fer doit être bio-assimilable pour le plancton et très largement réparti. D'autre part, les boucles de rétroaction des écosystèmes marins sont encore mal cernées ;

b-Rejet en mer (via les fleuves) de grandes quantités de déchets agricoles (résidus de récolte), qui selon Stuart E. Strand et Gregory Benford (du Département de physique et astronomie de l'université de Washington) serait la seule méthode actuellement reproductible, pratique, économique, immédiatement applicable, sans « dommages inacceptables » ayant un impact significatif et pouvant traiter de grandes quantités de carbone pour des milliers d'années^[30]. Selon eux : après 20 ans, 92 % de ce carbone serait séquestré dans les grands fonds alors que la production d'éthanol cellulosique n'a qu'un rendement de 32 % et que le sol n'en aurait séquestré que 14 %. L'océan profond pourrait ainsi selon eux capter 15 % de l'augmentation annuelle mondiale actuelle du CO₂, et le stocker pour des millénaires, sans besoins techniques nouveaux-

maximales d'absorption naturelle de CO₂ par l'océan semblent souvent déjà atteintes.

3.1.3.10. Stockage minéral .

Le stockage sous forme stable et inertée (par exemple de carbonates insolubles : réaction du CO₂ avec certains minéraux silicatés très réactifs tels que l'olivine ou la serpentine présent dans les roches basaltiques et mafiques et transformation en carbonate de magnésium ou de fer insoluble) est la solution évaluée la plus sûre et durable, mais pour le moment la plus coûteuse et techniquement non maîtrisée à grande échelle. Cette altération forcée est en particulier très coûteuse en énergie (selon le GIEC (2005). Avec les technologies actuelles, il faudrait 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 tests de minéralisation du CO₂ sous forme de carbonates sont effectués sur le site de la centrale géothermique de Hellisheiði (Islande) dans le cadre du projet CarbFix. Le CO₂ est injecté avec de l'eau à une profondeur comprise entre 400 et 800 m (il faut 25 tonnes d'eau par tonne de CO₂ injecté) et réagit avec le calcium, le magnésium et le fer présents dans la roche pour former des carbonates. Plus de 95 % du CO₂ injecté est minéralisé au bout de deux ans.

3.1.3.11. Autres processus expérimentaux

- La séquestration peut être réalisée par des micro-organismes élevés en réacteur et le stockage ou valorisation de la biomasse produite (sous forme de matériaux bio sourcés, combustibles, produits chimiques, bio plastiques, 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, pour le compte de l'énergéticien RWE. Ces micro-organismes seraient les plus performants pour absorber de grandes quantités de CO₂. Brain AG et RWE envisagent une commercialisation du procédé avant 2025.
- La séquestration dans des solides (MOF ou Metal-organic framework) 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).

3.1.4. Risques et impacts environnementaux

Ils sont essentiellement sismiques (séisme induit) et liés aux risques de fuites durant la concentration et le transport puis le stockage à court, moyen ou long terme. Ces fuites peuvent affecter l'eau, l'air, les sols ou les nappes. Tous ces impacts sont environnementalement problématiques, mais encore difficiles à modéliser précisément faute de connaissance suffisante, notamment sur l'écologie des grands fonds et sur le fonctionnement écosystémique de l'océan mondial (en particulier sur les très nombreux virus marins qui « contrôlent » et limitent la croissance du plancton et les effets de la méthanisation).

- 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. Peu de données concernent les capacités d'adaptation et de résilience des communautés vivantes à une fuite de CO₂. Mais on sait que le CO₂, au-delà de certains seuils, est à la fois un asphyxiant, un eutrophisant et un acidifiant (il forme avec l'eau de l'acide carbonique (H₂CO₃). Il tuerait la

plupart des formes de vies dans les zones où il serait massivement présent, dont dans les parties peu diluées du *panache* se formant au point de fuite). S'il diffusait en quantité ou durablement dans la colonne d'eau, il y attaquerait aussi certaines formes de vie planctonique, les coraux et roches calcaires (qui sont un puits de carbone).

- Le CO₂ est un nutriment pour le phytoplancton, mais il sur-favorise le plancton non fixateur de calcium, et le dopage de l'activité planctonique qu'il induit peut rapidement 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 relargués accéléreraient le réchauffement climatique.
- Une étude intégrée et multidisciplinaire de 2018 a porté sur les impacts écologiques de fuites de CO₂ sur l'écosystème benthique marin, à partir d'une méta-analyse d'études expérimentales et *in situ*. Elle montre qu'une fuite de CO₂ affecterait fortement les processus

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

biogéochimiques, et la composition des communautés microbiennes et fauniques. La biodiversité de fonds marins naturellement *ventilés* par du CO₂ géologique est en effet bien plus faible que celle des sables non-exposés^[42]. Des flux de CO₂ de 4 à 7 moles par m² et par heure ont entièrement dissous le carbonate sédimentaire, et une migration conjointe du fer et des silicates a induit une dystrophisation (explosion du microphytobenthos de +450 %) et des stocks sur pied (+300 %). Et en dépit d'une disponibilité alimentaire apparemment accrue, la biomasse faunique a chuté de -80 % alors que la diversité trophique diminuait aussi par rapport au site de référence. La structure des communautés bactériennes et ses aspects fonctionnels ont aussi été bouleversés (ex. : modification de la part des hétérotrophes et effondrement de 90 % des sulfates microbiens) Ces modifications persistent tant que le taux de CO₂ ne redescend pas.

- La vie semble discrète et clairsemée dans les grands fonds, mais elle est localement densément présente (sur les cadavres de cétacés, 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.

3.1.4.1. Coûts

Les coûts sont évalués à 40 à 80 dollars américains 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

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

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)

160 à 320 Mds € pour les 100 GW prévus en 2050. Le prix du carbone devrait atteindre 35 à 60 €/tonne de CO₂ pour rendre la CCS compétitive dans les centrales à charbon et 90 à 105 €/tCO₂ pour les centrales à gaz naturel ; un système de prix garantis semblable à celui en vigueur pour les énergies renouvelables pourrait rendre la CCS compétitive à partir de 140 €/MWh pour le charbon et 190 €/MWh vers 2020, prix qui pourraient descendre à 110 €/MWh vers 2030 ; en comparaison, le gouvernement britannique garantit 190 €/MWh aux éoliennes offshore en 2014/15

3.1.4.2. 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.

Des méthodes utilisant la catalyse ou inspirées des processus biochimiques

naturels sont à l'étude, dont celui dit de la boucle chimique.

CONCLUSION

La séquestration du dioxyde de carbone, appelée plus simplement piégeage du carbone ou séquestration du carbone (on parle parfois de piégeage ou d'emprisonnement, après une étape de captage et éventuel transport) est le stockage à long terme du dioxyde de carbone hors de l'atmosphère. C'est l'une des techniques et mesures envisagées pour atteindre les engagements climatiques et énergétiques de la communauté internationale (Accord de Paris).

La séquestration industrielle (ou artificielle), qui implique différentes techniques telles que le stockage géologique de carbone, qui consiste à capter le CO₂ industriel à son point d'émission (centrale électrique, cimenteries, aciérie ...), à le concentrer et le transporter vers un site géologique adéquat pour son stockage ;

La séquestration biologique (naturelle), appelée bio-séquestration qui implique des processus biologiques permettant de capter et stocker le CO₂ atmosphérique par le biais des équilibres du cycle du carbone. Dans les temps passés, elle est responsable de la formation des vastes gisements de charbon et de pétrole qui sont actuellement brûlés.

La séquestration naturelle s'appuie sur la capacité des organismes vivants à synthétiser des molécules organiques à partir de CO₂ atmosphérique ou en recyclant de la matière organique

Séquestration du dioxyde de carbone
Dr Hanitra RATOVOHAJA (1)

Enseignant chercheur, Maître de Conférences à l'IUGM/UMG

Tél : 032 83 917 41 / 034 07 577 85

e-mail : ratovohaja@gmail.com/hanitra_ratovohaja@yahoo.fr

préexistante, et à stocker cette matière (puits de carbone). Ce processus, complémentaire de la séquestration géologique, est adapté aux sources d'émissions diffuses (transports, habitat, etc.) 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^[2], agences et États pour atténuer les effets du réchauffement climatique et notamment dans le cadre du protocole de Kyoto.