# Université Libre de Bruxelles Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire Faculté des Sciences Master en Sciences et Gestion de l'Environnement



La géo-ingénierie est-elle une piste rationnelle pour atténuer le changement climatique?

Le cas de la méthode de capture et stockage du CO<sub>2</sub>.

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par Benjamin VIVES en vue de l'obtention du grade académique de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement Finalité Gestion de l'Environnement Ma120ECTS ENVI5G-M Année Académique 2013-2014

Directeur: Jean-Louis TISON

Co-directeur: Michel HUART

#### **Remerciements:**

Je remercie ma partenaire, Aslaug Rohne, qui m'a donné des conseils avisés et m'a également permis de rencontrer Mr Bjørn Stålen Kaavik, conseiller pour l'énergie au sein du ministère norvégien du climat et de l'environnement.

Je remercie également toute ma famille pour avoir consacré un morceau de vacances à la géoingénierie. Je remercie aussi Pierrick Poulenas et Manon Bourguignon, pour leur conseils divers et variés. De même, je remercie Karin Moehler, pour sa brève mais importante relecture.

Je remercie Mr Tison, qui a pris le temps de me recevoir avant ses vacances et qui m'a donné de nombreux conseils sur la forme de rédaction d'un mémoire en science.

Enfin, je vais remercier *Le climat belge*, qui par une couverture nuageuse intense et des températures idéales, m'a permis de travailler ces derniers mois dans de bonnes conditions.

#### Résumé:

Le changement climatique est une équation, faite de nombreux paramètres complexes, qui pose des questions auxquelles l'humanité semble ne pas avoir de réponse immédiate. Les objectifs de réduction de gaz à effet de serre (GES), définis lors des accords du protocole de Kyoto en 1995, ne semblent pas pouvoir être respectés. Un objectif clair a été fixé: limiter l'augmentation de la température à moins de 2°C. D'après l'analyse de nombreux experts du climat, cet objectif devrait être difficile à atteindre.

Outre l'efficience énergétique, la modification de nos modes de vie, ou encore l'utilisation d'énergies renouvelables, d'autres solutions sont envisagées pour atténuer le changement climatique de manière plus rapide. Il s'agit des méthodes dites *géo-ingénierie* ou *ingénierie* du climat. La première catégorie vise à agir sur la relation entre les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et leur accumulation dans l'atmosphère ou les océans. Ce sont les méthodes de retrait du CO<sub>2</sub> (CDR). La seconde consiste à briser le lien existant entre le CO<sub>2</sub> et le réchauffement de la planète qui lui est associé. Ce sont les méthodes de gestion du rayonnement solaire (SRM).

Les deux catégories soulèvent de nombreuses questions car des effets secondaires et « rebonds » sont associés à tous les procédés. Les méthodes CDR paraissent néanmoins « moins mauvaises » que les méthodes SRM. Ces deux catégories sont encore à l'état de recherche, financées pour l'instant par de riches investisseurs privés.

A l'inverse, la technologie de capture et de stockage du CO<sub>2</sub> (CCS), que l'on pourrait percevoir comme une méthode de géo-ingénierie, a la faveur des institutions politiques européennes. Cette technologie coûte encore cher, mais l'Union européenne (UE) semble décidée à faciliter son développement. Néanmoins, l'expérience norvégienne sur ce sujet devrait pouvoir empêcher d'agir précipitamment, car la complexité et les risques de cette technologie ont parfois été sous-estimés par le passé.

# Table des matières

	REMERCIE	MENTS	III
	ABREVIATI	ONS UTILISEES	VII
	UNITES SI	(Systeme International)	X
	AUTRES UN	IITES FREQUEMMENT UTILISEES	XI
	OBJECTIF D	OU MEMOIRE ET QUESTION SCIENTIFIQUE	XII
	APPROCHE	SCIENTIFIQUE	XII
	LISTE DES F	IGURES	XIII
	LISTE DES T	ABLEAUX	XIV
۱N	NTRODUC	TION	1
1.	. ETAT D	ES LIEUX DU CLIMAT	3
	1.1 BILA	AN DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE	3
	1.2 LES	PREVISIONS POUR LE FUTUR	6
	1.2.1	Le forçage radiatif	6
	1.2.2	Les scénarios du GIEC	7
	1.2.3	« Budget carbone mondial»	9
2	QU'EST	-CE QUE LA GEO-INGENIERIE?	11
	2.1 PRE	SENTATION	12
	2.2 ME	THODES DE RETRAIT DE $CO_2$ DE L'ATMOSPHERE	14
	2.2.1	Afforestation et reforestation	14
	2.2.2	Création de biochar et stockage dans le sol	15
	2.2.3	Fertilisation de l'océan par ajout de substances nutritives (IOF)	17
	2.2.4	Augmentation de l'altération de roches silicatées dans les terres/océans	19
	2.2.5	Correction de l'acidité de l'océan	21
	2.2.6	Capture directe dans l'air	22
	2.2.7	Bio-énergie avec capture et stockage de carbone (BECCS)	23
	2.2.8	Synthèse	24
	2.3 ME	THODES DE GESTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE	27
	2.3.1	Aérosols stratosphériques	28
	2.3.2	Miroirs réfléchissants dans l'espace	31
	2.3.3	Eclaircissement des nuages terrestres/marins	32
	2.3.4	Amplification de l'albédo de surface	
		1 Dans les terres	
	_	2 Dans les océans	_
		THESE	
		ANCEMENT, GOUVERNANCE, ETHIQUE DE L'INGENIERIE DU CLIMAT	
3		TURE ET LE STOCKAGE DU CO₂ (CCS)	
		ROCHE TECHNIQUE	
	3.1.1	Captage	
	3.1.2	Transport	
	3.1.3	Stockage	
	3.1.4	Technologies en place	46

	3.2	APPROCHE ECONOMIQUE	49
	3.2	2.1 Coût de la production d'électricité avec capture de carbone	49
	3.2	2.2 Le système d'échange des émissions de l'Union européenne (EU ETS)	51
	3.3	RISQUES ECOLOGIQUES	54
	3.4	RESISTANCES SOCIALES ET ECONOMIQUES	54
	3.5	RETOUR D'EXPERIENCE: LE CAS NORVEGIEN	56
	3.6	ENERGIES FOSSILES DANS LE MONDE	57
	3.7	CONDITIONS DE SUCCES POUR LE FUTUR	58
4	PIS	TE D'AMELIORATION: VALORISATION DU CO <sub>2</sub> INDUSTRIEL	60
CC	ONCL	USION	63
ΑI	NNEX	(ES:	72

#### Abréviations utilisées

#### Organisations:

ADEME: Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie.

AIE: Agence Internationale de l'Energie (IEA: International Energy Agency)

CE: Commission européenne

GIEC: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change).

IEW: Inter Environnement Wallonie

MDP: Mécanisme de Développement Propre (dans le cadre du Protocole de Kyoto)

OCDE: Organisation de coopération et de développement économique (OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development).

ONG: Organisation Non Gouvernementale.

UE: Union européenne

ULB: Université Libre de Bruxelles.

ZEP: Zero Emission Platform (Plate forme zéro émission: groupe de lobby en faveur du CCS).

#### Techniques:

GES: gaz à effet de serre.

CO<sub>2</sub>: Dioxyde de carbone.

C: Carbone (facteur de conversion :  $C/CO_2 = 1/3.67$ ).

NH<sub>4</sub>: Ammonium.

SO<sub>2</sub>: Dioxyde de soufre.

NO<sub>2</sub>: Dioxyde d'azote.

Equivalent carbone: unité de mesure commune du potentiel de réchauffement global construit à partir des six gaz à effet de serre évalués par le protocole Kyoto dans le cadre de la convention UNFCCC en unité de forçage radiatif équivalent CO<sub>2</sub>.

RF: Radiative Forcing (forçage radiatif).

RCP: representative concentration scenarios (profils représentatifs d'évolution de concentration).

SRES: special report on emissions scenarios (Rapport spécial sur les scénarios d'émissions).

IAM: Integrated analysis models (Modèles d'analyses intégrées).

CDR: Carbon Dioxyde R

emoval (Retrait de dioxyde de carbone).

SRM: Solar Radiation Management ou Sunlights Reflexion Methods (Gestion du rayonnement solaire).

CCN: Cloud Condensation Nucleus (Condensation nucléique des nuages).

IOF: Iron Ocean Fertilisation (fertilisation de l'océan par le fer).

CCS: Carbon Capture Storage (capture et stockage du dioxyde de carbone).

IGCC: Integrated Gasification Combined Cycle (cycle combiné de gazéification intégrée).

HNLC: High-Nutrient Low Chlorophyll Zone (Zone océanique à haute concentration de nutriment associé à un faible quantité de biomasse).

EOR: Enhanced Oil Recovery (Récupération assistée des hydrocarbures).

USDA: United States Department of Agriculture (Département de l'agriculture des Etats-Unis).

EU ETS: European Union Emission Trade Scheme (Système d'échange d'émissions de l'Union européenne).

BASE: Base power plant with CO2 capture (Centrale électrique avec capture de CO<sub>2</sub>).

OPTI: Optimised power plant with CO<sub>2</sub> capture (Centrale électrique optimisée avec capture de CO<sub>2</sub>).

CAPEX: Capital expenditure or investment (Dépenses en capital ou en investissement).

O&M: Operation and Maintenance (Opération et maintenance).

Les abréviations dont la définition est donnée en anglais, seront conservées sous cette forme dans le texte.

# Unités SI (Système International)

Quantité Physique	Unité	Symbole
longueur	mètre	m
masse	kilogramme	kg
temps	seconde	S
température	kelvin	K
quantité de substance	mole	mol

Multiple	Préfixe	Symbole
1,0E+01	deca	da
1,0E+02	hecto	h
1,0E+03	kilo	k
1,0E+06	mega	M
1,0E+09	giga	G
1,0E+12	tera	T
1,0E+15	peta	P
1,0E+18	exa	Е

Quantité physique	Nom de l'unité	Symbole	Définition de l'unité
force	Newton	N	kg.m.s <sup>-2</sup>
pression	Pascal	Pa	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-2</sup>
énergie	Joule	J	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-2</sup>
puissance	Watt	W	kg.m <sup>2</sup> .s <sup>-3</sup> (=J.s <sup>-1</sup> )
fréquence	Hertz	Hz	s <sup>-1</sup> (cycle par seconde)

#### Autres unités fréquemment utilisées

 $^{\circ}$ C: degré Celsius: (0  $^{\circ}$ C = 273,15 K)

ppm: parties par million (10<sup>6</sup>)

ppmv: parties par million  $(10^6)$  en volume. Les gaz tels que le  $CO_2$ , le  $N_2O$ , ou le  $CH_4$  doivent être quantifiés en ppmv car on mesure leurs concentrations dans le volume qu'est l'atmosphère. Par abus de langage, ils sont souvent mesurés en ppm, ce qui est toutefois compréhensible.

Kt: kilotonnes. (10<sup>3</sup> tonnes)

GtC: gigatonnes de carbone,  $1 \text{ GtC} = 10^9 \text{ tonnes de C} = 3.67 \text{ Gt de dioxyde de carbone.}$ 

PgC: petagrammes de carbone, 1 PgC = 1 GtC= 10 15 g de carbone.

MtN: megatonnes (10<sup>6</sup> tonnes) d'azote.

MtC: megatonnes (10<sup>6</sup> tonnes) de carbone.

TgC: teragrammes de carbone (1 TgC = 1 MtC).

tC: tonne de carbone.

TgCH<sub>4</sub>: teragrammes de méthane.

TgN: teragrammes d'azote.

TgS: teragrammes de souffre.

MWe: megawatts d'électricité.

Tce: tonnes de charbon équivalent.

Toe: tonnes de pétrole équivalent.

Boe: barril de pétrole équivalent.

KWh: kilowatt heure.

MWh: megawatt heure.

#### Objectif du mémoire et question scientifique

C'est suite à une conférence organisée par Mr Zaccai en octobre 2013 à l'Université libre de Bruxelles (ULB) sur le thème de la géo-ingénierie, que l'idée d'approfondir la question s'est fait ressentir. Est-ce vraiment une piste d'atténuation du changement climatique? Que peut-on considérer comme de la géo-ingénierie? Quelles sont les options que certains proposent? Est-ce que cela pourrait avoir un réel impact sur les objectifs de réduction des gaz à effet de serre (GES)? Et si tel est le cas, quels sont les risques éventuels? L'approfondissement de ces questions amène naturellement à s'en poser d'autres. Nous avons choisi de consacrer un chapitre entier à la technologie de capture et stockage du carbone (CCS), méthode aujourd'hui défendue par la Commission européenne (CE) comme faisant partie du portfolio d'atténuation du changement climatique. Que proposent les politiques aujourd'hui? Pouvons-nous considérer cette méthode comme de la géo-ingénierie? Quelles sont les clés de son développement en Europe?

L'objectif final de ce mémoire est d'essayer d'évaluer ce qui pourrait être le plus rationnel pour atténuer le changement climatique. Les choix fait aujourd'hui sont-ils les bons?

#### Approche scientifique

La revue de la littérature existante constitue la base de travail de ce mémoire. Le livre « Les Apprentis sorciers du climat » de Clive Hamilton a été d'une grande aide pour initier la réflexion que sous-entend ce mémoire. D'autres ouvrages tels que ceux publiés par l'Agence Internationale du Climat ont également permis d'orienter les recherches.

Aucune activité de recherche « stricto sensu » ne sera réalisée pour rédiger ce mémoire. Celui-ci est principalement basé sur une étude approfondie de la littérature scientifique existante.

Quelques entretiens avec Mr Tison, directeur de mémoire, Mr Huart, co-directeur, ont permis d'évoquer des questions pertinentes et de ne pas stagner.

Pour la partie sur la capture et le stockage du CO<sub>2</sub> (CCS), un entretien d'une heure a été réalisé avec Mr Bjørn Stålen Kaavik, conseiller pour l'énergie au sein du ministère norvégien du climat et de l'environnement, détaché à Bruxelles, spécialiste des questions politiques sur le CCS.

#### Liste des figures

- Figure 1: Concentration de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère, exprimée en ppm.
- Figure 2: Courbe de Keeling. Concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère exprimée en ppm.
- Figure 3: Estimation du forçage radiatif total de la Terre en 2011, relatif à 1750.
- Figure 4: Historique et projection du RF anthropogénique (W.m<sup>-2</sup>) entre la période 1950 et 2100, relatif à la période préindustrielle.
- Figure 5: « Budget Carbone » pour 2°C.
- Figure 6: Schématisation simplifiée des méthodes de géo-ingénierie.
- Figure 7: Illustration schématique du concept de biochar par pyrolyse.
- Figure 8: Légende du tableau 1.
- Figure 9: Effets « rebonds » lié à un retrait du CO<sub>2</sub> anthropogénique en une fois.
- Figure 10: (A) Evolution de la température par rapport à 1990 pour le scénario «business as usual»; (B) le cas où la géo-ingénierie serait appliqué de 2020 à 2059, puis brusquement arrêtée.
- Figure 11: Point de Lagrange.
- Figure 12: Légende du tableau 2.
- Figure 13: Localisation de potentiels sites de stockage de CO<sub>2</sub> en Europe.
- Figure 14: Estimation du coût pour centrale à charbon avec capture de CO<sub>2</sub>.
- Figure 15: Coût par tonne de CO<sub>2</sub> capté pour des centrales à charbon avec CCS.
- Figure 16: Schématisation d'un procédé de méthanisation intégrant du CO2 récupéré de sources industrielles.

## Liste des tableaux

Tableau 1: Vue synthétique des méthodes CDR.

Tableau 2: Vue synthétique des méthodes SRM.

Tableau 3: Liste des projets CCS en cours.

#### Introduction

Le monde actuel fait face à un phénomène qui ne s'était jamais produit au cours des 800 000 dernières années, dont l'origine est *très probablement* anthropique<sup>1</sup>. En utilisant en grande quantité les ressources fossiles enfouies depuis des millions d'années dans la croûte terrestre, les hommes ont accéléré un phénomène naturel, l'effet de serre.

L'effet de serre joue un rôle indispensable dans le développement de la vie sur Terre, tel que nous la connaissons aujourd'hui. Sans lui, la température moyenne à la surface de la Terre serait de -18°C. Il est fort probable qu'une température moyenne aussi froide aurait eu un impact déterminant sur le développement de la vie, à commencer par l'eau sous forme liquide. Mais grâce à l'effet de serre que procure l'atmosphère, la température est propice au développement de la vie. A l'inverse, un effet de serre trop important conduirait à une augmentation de la température moyenne. C'est bien là le défi de notre temps. Nous allons voir que les preuves du réchauffement sont de plus en plus évidentes et qu'elles sont *très probablement* liées aux activités humaines.

De nombreux scientifiques, à travers le monde, clament pour une réduction urgente des émissions de gaz à effet de serre (GES), en amélioration l'efficience énergétique, en modifiant nos modes de vie et en passant à un système d'énergies renouvelables. Une énergie qui serait basée uniquement sur des flux (air, soleil, vent, eau, biomasse, géothermie), plutôt que sur un stock (charbon, gaz, pétrole). Mais pour l'instant, les énergies fossiles utilisées pour la production énergétique mondiale représentent les deux tiers des émissions totales de  $CO_2^2$ .

En 1997, le protocole de Kyoto a été signé par 184 pays. Il s'ajoute à la Convention-Cadre des Nations Unis sur le changement climatique<sup>3</sup> et a pour but de faire baisser les émissions de GES pour les pays signataires. Seulement, pour l'instant, les émissions mondiales de GES n'ont pas diminuées. Les émissions de GES continuent de s'accumuler dans l'atmosphère et le rythme semble également s'accélérer. Cela serait du à l'expansion économique de la Chine d'une part, à

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> IPCC AR5, 2013, *Introduction*, dans: *Climate Change, The Physical Science Basis*, 2013. Le terme « très probable» (ou « very likely » en anglais) est largement expliqué dans leur rapport, il correspond à une probabilité de 90-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> OECD, 2011, Environmental Outlook to 2050, Climate Change Chapter, p.10.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>http://unfccc.int/portal\_francophone/essential\_background/kyoto\_protocol/status\_of\_ratification/items/3346.php, consulté le 24 juillet 2014.

«l'American way of life» d'autre part<sup>4</sup>. D'autres pays ont également suivi, dans une moindre mesure, en terme de consommation énergétique par habitant<sup>5</sup>.

Ce travail de fin d'étude a pour objectif de donner des éléments sur les pistes envisagées qui pourraient être mises en place pour atténuer le changement climatique. L'approche se veut généralement large car le problème du changement climatique ne se limite pas à la Belgique ni même à l'Europe. Le changement climatique à résoudre est global, même si les conséquences sont régionales.

Dans ce document, la première partie contient des informations sur le climat et montre le lien entre l'homme et son environnement. La deuxième partie vise essentiellement à expliquer ce qu'est l'ingénierie du climat, ou géo-ingénierie. Parmi les pistes étudiées, on peut citer la gestion du rayonnement solaire via l'injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère, qui permettrait de réduire l'énergie reçue des rayons du soleil, et donc la température à la surface de la Terre. On peut citer également la fertilisation de l'océan par le fer, qui a pour but d'accélérer le processus naturel grâce auquel le CO<sub>2</sub> est transféré vers les profondeurs sous-marines, et stocké. Nous essaierons de donner une estimation de leurs potentiels, mais également exposer les probables effets secondaires, et les effets dit « rebonds ». Dans la troisième partie, nous nous intéresserons à la technique de capture et séquestration du carbone, d'un point de vue technique, économique, social, et environnemental. Nous porterons une attention particulière au développement de cette technique en Norvège, car ce pays est le seul pays européen à capter et stocker du dioxyde de carbone, chaque année depuis 1996.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> OECD, 2011, Environmental Outlook to 2050, Climate Change Chapter.

<sup>5</sup> Ibid.

#### 1. Etat des lieux du climat

#### 1.1 Bilan des émissions de gaz à effet de serre

Dans son livre *Les apprentis sorciers du climat*, Clive Hamilton dresse un tableau peu optimiste de l'état actuel du climat. Selon lui, « même en tablant sur l'hypothèse optimiste d'un sursaut rapide des Etats face au danger, des transformations spectaculaires et durables du climat de la Terre semblent désormais inévitables »<sup>6</sup>. Il est vrai que la situation actuelle est peu favorable à l'optimisme. Dans le dernier rapport du premier groupe de travail d'experts intergouvernemental sur l'étude du climat (GIEC WG1), il est indiqué qu'il est *virtuellement certain* (99-100%) que l'origine du changement climatique est due à l'espèce humaine et que l'objectif critique de réchauffement global de 2° C à ne pas dépasser risque de ne pas être respecté.

Leur discours est clair: « Le réchauffement du système climatique est sans équivoque, et depuis 1950, de nombreux changements sont sans précédents depuis des décennies, voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la quantité de neige et de glace a diminué, le niveau de l'océan a augmenté, et la concentration de gaz à effet de serre a augmenté »<sup>7</sup>.

La figure 1 indique la quantité de GES relâchée dans l'atmosphère par l'homme depuis le début de l'ère industrielle. Les mesures ont été effectuées à proximité de la base franco-italienne Concordia (Dôme C). Grâce à un forage d'une profondeur de 3270m dans la glace de l'Antarctique, les scientifiques ont pu retracer la concentration de trois gaz dans l'atmosphère sur une période de 800 000 ans<sup>8</sup> (8 cycles climatiques glaciaires-interglaciaires). Il s'agit du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), du méthane (CH<sub>4</sub>) et de l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O).  $\delta$ D (%o) (courbe noire) correspond à l'abondance isotopique relative d'hydrogène, qui est un proxy de la température et permet de faire le lien entre concentration de GES dans l'atmosphère et température. C'est grâce à cet indicateur que les concentrations des trois gaz ont pu être retracées sur une période aussi grande.

L'analyse de la figure 1 démontre que la quantité de CO<sub>2</sub> (courbe rouge) relâchée dans l'atmosphère au cours de la période industrielle est équivalente à celle libérée dans l'atmosphère

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Clive Hamilton, 2013, Les apprentis sorciers du climat, 338 p.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> IPCC AR5, 2013, Summary for policy makers, dans: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> http://www2.cnrs.fr/presse/communique/1339.htm, consulté le 24 juillet 2014.

lors du passage d'une période glaciaire à interglaciaire. En chiffre, cela correspond à une augmentation de 115 ppm, passant de 285 ppm avant l'ère industrielle à 400 ppm aujourd'hui, seuil dépassé récemment<sup>9</sup>.

#### Glacial-Interglacial Ice Core Data 320 240 360 200 CO<sub>2</sub> (ppm) 320 280 240 1600 200 1400 1200 (qdd) 1000 മററ £ 600 -360 -380 -400 -420 -440 600 500 400 300 100 Time (thousands of years before present)

### Figure 1: Concentration de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O et CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère, exprimé en ppm. Echelle de temps: milliers d'années avant aujourd'hui. Source: Données des carottes glaciaires, Concordia, Dôme C.

On peut également remarquer que deux autres gaz contribuant à l'effet de serre (le méthane (CH<sub>4</sub>) et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O)) ont vu leurs concentrations fortement augmenter au cours du dernier siècle, à des proportions et des vitesses jamais observées au cours des derniers 800 000 ans. Depuis le début de l'ère industrielle (vers 1750), environ la moitié des émissions anthropocentriques de CO<sub>2</sub> émises dans l'atmosphère a été absorbée par les océans et les sols, causant notamment le phénomène d'acidification des océans<sup>10</sup>.

L'évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère révèle, qu'outre l'augmentation de la quantité cumulée, il se produit dans le même temps une accélération du phénomène. La figure 2 correspond à la courbe de Keeling, qui mesure les concentrations de CO2 sur le volcan Mauna

Ce seuil a été dépassé précisément le 9 mai 2014. http://www.notreplanete.info/actualites/actu\_3727\_concentration\_CO2\_400\_ppm, consulté le 18 juillet 2014 <sup>10</sup> IPCC AR5, 2013, *Observations: Ocean*, dans: *Climate Change, The Physical Science Basis*, 2013.

Loa à Hawai. Elle montre que la concentration augmentait de 0,7 ppm par an à la fin des années 1950, pour dépasser les 2 ppm par an à partir des années 2000.

#### THE KEELING CURVE

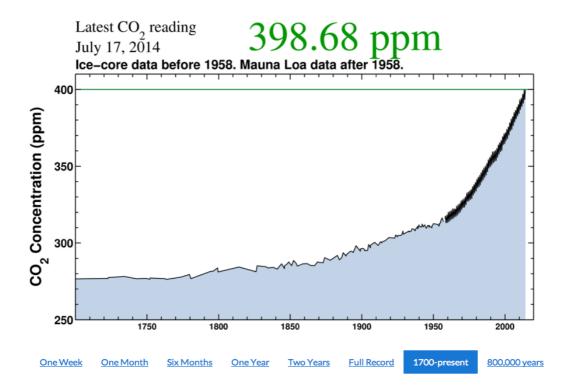


Figure 2 : Courbe de Keeling. Concentration de  $CO_2$  dans l'atmosphère exprimée en ppm, entre 1700 et 2014. Mesures effectuées sur le volcan de Mauna Loa, à Hawaï. (la courbe entre 1950 et 2014 est consultable en annexe 5). Source : https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/.

D'après les paléoclimatologues, la quantité cumulée de gaz à effet de serre dans l'atmosphère rejetée par les activités de l'espèce humaine représente environ 555 PgC. La grande majorité de ces émissions est due à la combustion des énergies fossiles et la production de ciment, pour environ 375 PgC. L'autre grand contributeur est la déforestation et le changement dans l'utilisation des sols, pour environ 180 PgC<sup>11</sup>. Au total, depuis 1750, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère a augmenté de 40%.

D'après les informations données par le GIEC, les émissions anthropiques s'élèvent à 7.8 PgC (plus ou moins 0.6) par an pour l'utilisation d'énergies fossiles (charbon, gaz, pétrole) et la production de ciment, et 1.1 PgC (plus ou moins 0.8) par an pour le changement dans

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> IPCC AR5, 2013, Summary for Policymakers, p. 12, dans: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013.

l'utilisation des sols<sup>12</sup>. De nombreux paramètres interviennent dans le cycle du carbone mais l'estimation de l'augmentation actuelle de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère est de 4 PgC par an<sup>13</sup>.

#### 1.2 Les prévisions pour le futur

#### 1.2.1 Le forçage radiatif

Le forçage radiatif (RF) peut se définir comme étant le bilan d'énergie radiative reçu par un système. Si le système reçoit plus d'énergie radiative qu'il n'en émet, le RF est positif. Si, au contraire, le système renvoie plus d'énergie qu'il n'en reçoit, le RF du système est négatif. En d'autres termes, un système dont le RF serait positif se réchauffe, un système dont le RF serait négatif se refroidit. Le RF est exprimé en watt par unité de surface.

La figure 3 montre quels sont les paramètres qui influencent le bilan planétaire global du RF. Le CO<sub>2</sub> est le plus grand contributeur, avec plus de 1.5 W.m<sup>-2</sup>, suivi du méthane pour 1 W.m<sup>-2</sup>. On peut également remarquer que certaines catégories, comme la catégorie « Aerosols and persecutors », ont un RF négatif et ont donc un effet refroidissant sur le système. Le GIEC, qui a publié ce graphique, rappelle l'incertitude des résultats. Cette incertitude est indiquée sur le graphique.

Une autre indication importante de la figure 3 est l'augmentation du RF constatée sur 3 années distinctes et éloignées dans le temps :

- En 1950, la valeur du RF était de 0.57 W.m<sup>-2</sup>
- En 1980, la valeur du RF était de 1.25 W.m<sup>-2</sup>
- En 2011, cette valeur atteint 2.29 W.m<sup>-2</sup>, avec une incertitude dans les résultats qui augmente également.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> IPCC AR5, 2013, *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*, p. 471, dans: *Climate Change, The Physical Science Basis*, 2013. Pour aller plus loin dans la compréhension du cycle du carbone, vous pouvez consulter en annexe 5 la schématisation simplifié du cycle du carbone d'où proviennent ces chiffres.

<sup>13</sup> Ibid.

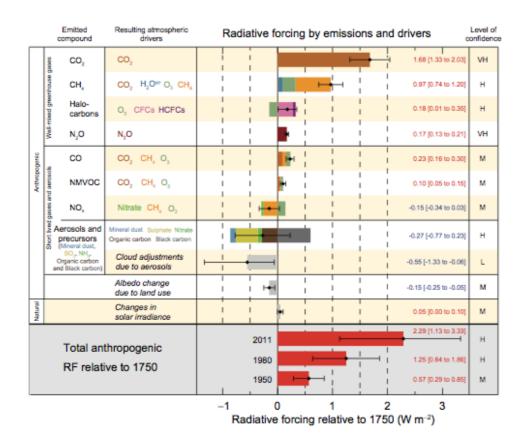


Figure 3: Estimation du forçage radiatif total de la Terre en 2011, relatif à 1750. Source: IPCC AR5, 2013.

#### 1.2.2 Les scénarios du GIEC

La figure 4 représente les différents scénarios (RCP<sup>14</sup> pour « profils représentatifs d'évolution de concentration », ou SRES<sup>15</sup> pour « rapport spécial sur les scénarios d'émissions ») qui sont susceptibles de se produire d'ici à 2100. L'ordre de grandeur en abscisse est le temps. L'ordre de grandeur en ordonnée est le forçage radiatif total de la planète Terre, en W.m<sup>-2</sup>.

<sup>14</sup> RCP: Representative concentration scenarios.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> SRES: Special report on emissions scenarios.

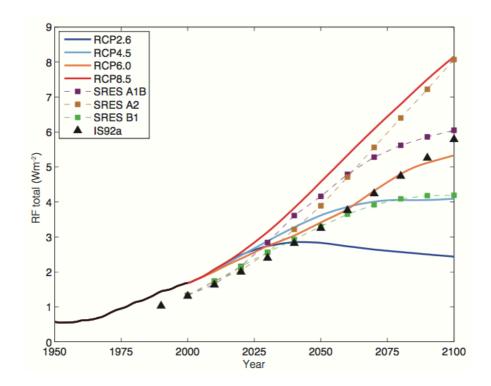


Figure 4: Historique et projection du RF anthropogénique (W.m<sup>-2</sup>) entre la période 1950 et 2100, relatif à la période préindustrielle (vers 1765). Source: IPCC AR5, 2013, Introduction, dans : Climate Change, The Physical Science Basis, 2013, p146.

Les scénarios SRES ont été développés en utilisant des modèles d'évaluations intégrées (IAMs), et résultent d'une analyse socio-économique sur la base des prévisions futures de développement économique et démographique<sup>16</sup>. Ils sont également basés sur l'analyse de la régionalisation, de la production d'énergie et de l'utilisation des technologies, des terres, des surfaces agricoles forestières.<sup>17</sup>

Les scénarios RCP sont des scénarios utilisés pour les nouvelles simulations de modèles climatiques. Ils ne sont pas basés sur des indicateurs socio-économiques comme le sont les scénarios SRES.

Les scénarios s'échelonnent du scénario RCP 2.6, pour le plus optimiste, aux scénarios RCP 8.5 et SRES A2, pour les plus pessimistes.

Le scénario RCP 2.6 prévoit une augmentation du RF jusqu'à 3W.m<sup>-2</sup> entre 2025 et 2050, puis redescend lentement pour atteindre environ 2.6 W.m<sup>-2</sup> en 2100. Les scénarios les plus

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> IPCC AR5, 2013, Introduction, p. 147, dans: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013.

<sup>17</sup> Ibid.

pessimistes prévoient une constante augmentation, pour atteindre un RF d'environ 8.5 W.m<sup>-2</sup> en 2100.

Il est important de rappeler également que le CO<sub>2</sub> déjà émis restera dans l'atmosphère pour une période bien plus longue que la persistance de la radioactivité des déchets nucléaires.

#### 1.2.3 « Budget carbone mondial»

La limite à ne pas dépasser pour rester en dessous du seuil de réchauffement global de 2°C est une quantité cumulée de 790 PgC<sup>18</sup>, ce qui correspond au scénario RCP 2.6. Il resterait donc, selon ce scénario, une quantité d'environ 250 PgC à pouvoir « utiliser » avant d'atteindre ce seuil de 2°considéré aujourd'hui critique par de nombreux experts du climat. En effet, au-delà de ce seuil, de nombreux écosystèmes seraient menacés. D'après le GIEC, le seuil de 2°C permet de limiter la majorité des événements abrupts. Au delà de ce seuil, quelques unes des conséquences pourraient être les suivantes<sup>19</sup>:

- Risques d'inondations pour des millions de personnes.
- Extinction de 30% des espèces vivantes.
- Tendance à la basse de la production céréalière dans les latitudes basses.
- Des millions de personnes pourraient expérimenter chaque année l'érosion des côtes.
- Changement dans la distribution de certains vecteurs de maladie.

Les conséquences seraient nombreuses. Quelques une se font déjà ressentir, comme la disparition des coraux dans certaines régions du monde, à cause de la modification du pH de l'eau de mer.

La figure 5 est un document réalisé par l'agence internationale de l'énergie (AIE). Les éléments suivants sont décrits par la figure:

- Emissions de GES déjà réalisées sur la période 1750-2011, représentées en vert.
- Estimation des émissions qui sont très probablement susceptibles de se produire sur la période 2012-2035, représentées en gris.
- « Budget carbone » restant avant d'atteindre le seuil de réchauffement considéré comme critique, sur base du scénario RCP 2.6., représenté en bleu.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> Ibid.

#### « Carbon budget » for 2°C

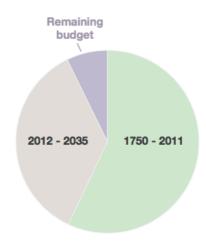


Figure 5: « Budget Carbone » pour 2° C°. Source : rapport Captage & stockage du carbone, IEW, 2013.

Ce graphique illustre l'urgence de la situation. Ces estimations sont, encore aujourd'hui, critiquées par un nombre restreint de scientifiques (Claude Allègre est un des climato-septique célèbre en France). Mais elles sont basées sur des faits scientifiques de plus en plus nombreux et irréfutables.

Donald Johnson, ancien secrétaire général de l'OCDE a dit : « Je ne suis pas pessimiste par nature, mais il faut plus d'optimisme que je ne peux en générer pour croire que le monde va limiter le réchauffement à 2°C par rapport au niveau préindustriel »<sup>20</sup>.

Du fait de cette urgence climatique de plus en plus visible et avérée, de l'incapacité du monde à réduire les émissions de GES de manière efficace, l'idée de géo-ingénierie a germé dans certains esprits. Plusieurs options d'ingénierie du climat sont aujourd'hui étudiées par quelques scientifiques à travers le monde.

Mais les scientifiques ne sont pas les seuls à s'intéresser à l'ingénierie du climat. Certaines forces financières s'y intéressent également. Car elle porte en elle l'espoir que la technique permettra d'atténuer le changement climatique, tout en maintenant la croissance et le développement économique basé sur les énergies fossiles.

-

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Citation de Donald Johnson, 2010, dans Clive Hamilton, 2013, *Les apprentis sorciers du climat*, p. 17.

#### 2 Qu'est-ce que la géo-ingénierie?

L'homme, depuis déjà quelques temps, tente de modifier les conditions météorologiques pour diverses raisons. François Gemenne rappelle que l'iodure d'argent est utilisée en France pour «faire pleuvoir» afin d'obtenir une meilleure qualité du vin<sup>21</sup>. Les chinois, avant le déroulement des jeux olympiques ont «fait pleuvoir» dans le but d'éviter la pluie lors de l'ouverture des jeux olympiques de 2008, avec plus ou moins de réussite<sup>22</sup>. Plus récemment, les vignerons français de grands crus ont mis en place des systèmes de fractionnement de grêlons pour réduire les dégâts provoqués par de violents orages, avec là encore plus ou moins de succès<sup>23</sup>. Mais ces applications consistent à modifier les conditions météorologiques uniquement localement. La géo-ingénierie interviendrait à une échelle beaucoup plus large.

La Royal Society a donné en 2009 une définition que nous utiliserons ici : « la géo-ingénierie est la manipulation délibérée à grande échelle de l'environnement planétaire pour agir contre le changement climatique d'origine anthropique »<sup>24</sup>.

Le premier à introduire le terme « géo-ingénierie » dans la littérature scientifique fut *Victor Marchetti* en 1977<sup>25</sup>. Mais c'est il y a une dizaine d'année environ, suite aux échecs successifs dans les différents sommets mondiaux sur le climat, que certains chercheurs et ingénieurs se sont intéressés à ce qui est appelé le « plan B ».

La géo-ingénierie, également dénommée ingénierie du climat, peut se diviser en deux grandes catégories.

Il y a d'abord les techniques de capture de carbone. Elles ont pour objectif de capter le  $CO_2$  de l'atmosphère et de l'injecter dans un lieu hermétique, où il ne participerait plus à l'effet de serre. D'après Clive Hamilton, «cette approche s'apparente à une opération de nettoyage de nos déchets qui souillent le ciel »<sup>26</sup>.

Il y a ensuite la catégorie qui regroupe les opérations qui consistent à neutraliser une des conséquences de l'augmentation des GES dans l'atmosphère: le réchauffement à la surface de la planète. Il existe une grande quantité de propositions de géo-ingénierie répertoriées sur

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> François Gemenne est intervenu dans le cadre de la conférence sur l'ingénierie du climat organisée le 7 novembre 2013 à l'université libre de Bruxelles.

http://www.lefigaro.fr/international/2008/07/29/01003-20080729ARTFIG00003-ils-chassent-les-nuages-du-cielde-pekin-.php, consulté le 9 août 2014.

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> http://telescoop.tv/browse/535592/2/le-journal-de-13h.html, consulté le 9 août 2014.

Royal Society, 2009, *Geoengineering the climate*, p77.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Ken Caldeira, Govindasamy Bala, Long Cao, 2013, *The Sciences of Geoengineering*.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> C.Hamilton, op.cip., p. 11.

Wikipédia. Parmi toutes ces pistes, environ 8 à 10 d'entre elles font l'objet d'une attention plus sérieuse<sup>27</sup>.

Le but de ce chapitre est de définir les différentes pistes sérieuses de géo-ingénierie. L'objectif est de donner, pour chacune d'entre elles, une estimation du coût, de la faisabilité et des potentiels éventuels pour atténuer le changement climatique.

#### 2.1 Présentation

D'après Clive Hamilton, il y aurait donc environ 8 à 10 techniques d'ingénierie du climat. Le GIEC en a répertorié douze, comme illustré sur la figure 6.



Figure 6: Schématisation simplifiée des méthodes de géo-ingénierie. Source: IPCC AR5, 2013, Clouds and Aerosols, p.632, dans: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013.

C'est la première fois, depuis que ce groupe d'experts a été constitué en 1988, que la géoingénierie est abordée dans un de leurs rapports sur le climat<sup>28</sup>. Un groupe de travail spécial,

-

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Ibid., p. 12.

connu sous le nom de WGIII, a été créé de façon à contribuer au cinquième et dernier rapport dont la synthèse sera achevée en octobre 2014. Ce groupe de scientifiques (WGIII) évalue les options d'atténuer le changement climatique et les exigences technologiques, économiques et institutionnelles sous-jacentes<sup>29</sup>.

La liste ci-dessous reprend les éléments donnés par la figure 6.

- A: Fertilisation de l'océan par ajout de substances nutritives (phosphate, azote, fer), ce qui augmente la productivité de l'océan en surface et transporte une fraction du carbone biogénique résultant vers le fond.
- B: Augmentation de l'alcalinité grâce à des minéraux solides ajoutés à l'océan, ce qui cause une augmentation du CO<sub>2</sub> dissout dans l'océan.
- C: Augmentation du taux d'effritements des roches silicatées et transport des minéraux carbonés dissous vers l'océan.
- D: Le CO<sub>2</sub> atmosphérique est capté directement dans l'air via des procédés chimiques et stocké soit dans le sous-sol, soit dans l'océan.
- E: La biomasse est brûlée dans une centrale électrique avec capture de carbone. Le CO<sub>2</sub> capturé est stocké soit dans le sous-sol, soit dans l'océan.
- F: Le CO<sub>2</sub> est capturé à travers l'afforestation ou la reforestation, pour être stocké dans les écosystèmes.
- G : Mise en place de miroirs réfléchissant dans l'espace pour diminuer la radiation solaire.
- H: Injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère.
- I: Augmentation de la réflectivité des nuages marins.
- J: Des microbulles sont produites à la surface de l'océan pour le rendre plus réflectif.
- K: Récoltes agricoles plus réflectives sélectionnées.
- L: Blanchiment des toits et autres structures.

Parmi ces techniques, il faut bien distinguer les deux catégories de pistes d'ingénierie du climat. D'une part, il y a les procédés de retrait de dioxyde de carbone de l'atmosphère (CDR). De l'autre, il y a les méthodes de gestion de la radiation solaire (SRM).

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Pour plus d'information sur leur travail, tous leurs rapports sont disponibles sur le site <u>www.ipcc.ch</u>. Il est possible de trouver également des versions en français.

http://mitigation2014.org/ est le site dédié au chapitre d'atténuation du changement climatique.

#### 2.2 Méthodes de retrait de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère

#### 2.2.1 Afforestation et reforestation

Le terme « afforestation » décrit la conversion d'une surface non boisée en une surface boisée à la condition que la surface en question était sans arbres depuis au moins 50 ans. Si la surface était occupée par des arbres moins de 50 ans avant l'action, le terme à utiliser est « reforestation » 30.

Les forêts du monde, outre leur fonction essentielle de « poumon » de l'humanité, ont une fonction de stockage du carbone. Dans les dernières décennies, environ 250 millions d'hectares ont été plantés, ce qui correspondrait à un puits de carbone de 0.3 PgC par an. Cela contribuerait pour environ 3% dans la compensation de la totalité des émissions de  $CO_2^{31}$ .

D'après les calculs les plus optimistes, 120 PgC pourraient être stockés en 2035 suivant l'hypothèse suivante: l'augmentation sera linéaire de 0 PgC par an en 2010 à 9.6 PgC par an en 2034, soit 4 fois le puits de carbone actuel mesuré pour les forêts<sup>32</sup>.

63 PgC de plus pourraient être stockés d'ici à 2060, ce qui porterait le total à 183 PgC. Ces calculs intègrent également l'hypothèse que la biomasse ne se dégradera pas sur cette période. En 2050, l'influence sur le RF total de la Terre pourrait être de - 0,49 W.m<sup>-2</sup>.

Ces chiffres semblent toutefois très optimistes, car le RF négatif obtenu par une nette augmentation du stockage de CO<sub>2</sub> dans la biomasse serait probablement compensé par un plus mauvais albédo de surface où l'afforestation est pratiquée.

L'albédo d'une surface est le rapport entre la quantité d'énergie reçue sur la quantité d'énergie renvoyée. A titre d'exemple, la neige fraiche possède un albédo proche de 1, elle renvoie la majorité de l'énergie solaire qu'elle reçoit. Par opposition, les forêts possèdent un albédo de l'ordre de 0.3. Elles absorbent donc beaucoup plus d'énergie lumineuse.

Dans certaines régions du monde, l'afforestation pourrait conduire à un effet de réchauffement<sup>33</sup>. Le choix de la région est donc déterminant. Appliquer l'afforestation dans les régions tropicales

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Tim Lenton et Naomi Vaughan, 2011, *A review of climate geoengineering proposals*, p750.

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Tim Lenton et Naomi Vaughan, 2013, *Geoengineering responses to climate change*, p5.

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> T.Lenton et N.Vaughan, 2011, op. cit., p751.

<sup>33</sup> Ibid.

provoque un effet refroidissant net, alors qu'il est contre productif de l'utiliser dans les régions situées dans les hautes latitudes, notamment à cause de la couverture neigeuse saisonnière<sup>34</sup>.

Pratiquer l'afforestation à grande échelle aurait aussi pour conséquence des modifications dans l'évapotranspiration et la rugosité des surfaces<sup>35</sup>.

D'après le rapport des Nations Unies, The UN-REDD Programme Strategy 2011-2015, il est rappelé que le secteur forestier et les autres secteurs qui impactent l'utilisation des sols - à travers la déforestation, la dégradation des forêts et les autres modifications de celles-ci – contribuent pour environ 17% des émissions globales de GES.

#### 2.2.2 Création de biochar et stockage dans le sol

Depuis des millénaires, le charbon de bois, type de charbon issu de la combustion du bois, est utilisé par les hommes. La majorité des connaissances sur le biochar, obtenu par pyrolyse de la matière organique, proviennent des études réalisées en amont sur le charbon de bois.

Le biochar apparait bien dans le rapport du GIEC en tant que méthode de géo-ingénierie. Cependant, sa classification en tant que tel est contestée. Le biochar ne peut pas se réduire à une seule application. D'après Simon Shackley et al.<sup>36</sup>, outre la possible réduction de gaz à effet de serre, les avantages du biochar sont nombreux:

- Améliore la structure, les propriétés et les qualités des sols.
- Augmente la productivité des cultures.
- Fournit de l'énergie, sous certaines conditions.
- Absorbe les polluants, les contaminants et réduit les nitrates dans les cours d'eau.
- Supprime les émissions d'oxyde nitreux et de méthane produits par les sols.

Le biochar est défini comme un solide carboné poreux, produit par conversion thermochimique de matière organique, sous atmosphère à faible concentration d'oxygène. Il possède des propriétés de stockage de carbone à long-terme et, éventuellement, une amélioration des propriétés des sols.

\_

<sup>34</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> IPCC AR5, 2013, *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*, p. 551, dans: *Climate Change, The Physical Science* 

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Simon Shackley et al., n.d., *Biochar, Tool for Climate Change Mitigation and Soil Management*, pp. 73-140, dans: T.Lenton et N.Vaughan, 2013, *op.cit*.

La méthode consiste à chauffer la matière organique à plus de 350°, sous atmosphère faible ou inexistante en oxygène. L'objectif est de pouvoir intégrer le produit obtenu dans les sols. Si le produit n'est pas adapté aux sols, on appelle cela charbon et non biochar.

Concernant la réduction potentielle de GES, l'intérêt porté au biochar est principalement du au carbone dit récalcitrant (carbone stable), qui résiste à l'oxydation chimique ou biologique susceptible de convertir le biochar en CO<sub>2</sub><sup>37</sup>.

La figure 7 illustre schématiquement le système de fabrication de biochar par pyrolyse.

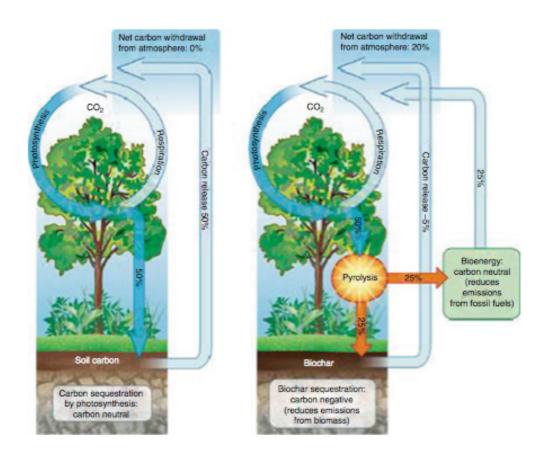


Figure 7: Illustration schématique du concept de biochar par pyrolyse. Source: Simon Shackley et al., n.d., dans: Tim Lenton et Naomi Vaughan, 2013.

Malgré le fait que le processus de pyrolyse nécessite de l'énergie, donc une émission supplémentaire de GES si cette énergie est obtenue grâce aux combustibles fossiles, certains experts démontrent que la combinaison suivante est une piste sérieuse pour mitiger les effets du changement climatique<sup>38</sup>:

Technologie de pyrolyse spécifique.

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Ibid., p. 74.

<sup>38</sup> Ibid.

- Transport.
- Distribution et infrastructures de stockage avec application de biochar.

La capacité de production de biochar est estimée par à 0.6 Gt par an<sup>39</sup>. En 2100, le potentiel de production de biochar pourrait atteindre 5.5 Gt à 9.5 Gt, assumant qu'une partie de la biomasse est utilisée spécifiquement dans ce but<sup>40</sup>.

Mais la production de biochar à très grande échelle serait confrontée à une forte compétition dans l'utilisation des terres, avec l'agriculture notamment. Les auteurs de cette étude avancent une divergence de presque 1000% dans la fiabilité de leurs hypothèses de calcul<sup>41</sup>. Une telle marge d'erreur décrédibilise l'évaluation du potentiel de cette méthode.

De plus, il a été constaté que le potentiel de stockage de carbone par utilisation de biochar reste limité, même en considérant une charge importante de 140 tC par hectare <sup>42</sup>.

Le biochar, en tant qu'autre application bénéfique à l'environnement, mérite qu'on s'y intéresse. Néanmoins, du fait de son faible potentiel de stockage et de la concurrence avec d'autres utilisations des sols, le biochar n'apparaît pas comme une option importante d'atténuation du changement climatique.

#### 2.2.3 Fertilisation de l'océan par ajout de substances nutritives (IOF)

Le principe de base de cette méthode est d'ajouter des substances nutritives (fer) à la surface des océans pour favoriser le développement de phytoplanctons. En mourant, ces organismes marins descendent vers les fonds marins et stockent le carbone emmagasiné pendant leur développement.

Ce procédé est sujet à beaucoup de controverses. Au début des années 2000, un groupe d'acteurs a essayé de vendre des crédits carbones en contrepartie de l'utilisation de cette technique. Sous le nom de compagnie « Plancktos », ces acteurs projetaient de séquestrer du CO<sub>2</sub> dans l'océan pacifique mais ils ont été stoppés par un groupe d'environnementalistes au nom de la protection

40 Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> Ibid.

<sup>42</sup> Ibid.

des fonds marins, de la recherche et de l'acte de « dumping » de l'océan. <sup>43</sup> L'intérêt commercial à utiliser la fertilisation par le fer pour générer des crédits carbones pourrait être une source de motivation pour les investisseurs <sup>44</sup>.

Selon l'hypothèse de John H. Martin, formulée en 1990, 20% des macronutriments des HNLC (High-nutrient low chlorophyll) seraient inutilisés<sup>45</sup>. En effet, l'azote, le phosphore et le fer sont les principaux éléments limitant pour l'existence et le développement de la biomasse vivante<sup>46</sup>. Philippe Bertrand donne une explication de ces zones appelées HNLC: « Dans les sols non cultivés continentaux comme dans la plupart des régions de l'océan, qui sont alimentées par les flux d'éléments dissous provenant de l'érosion continentale, le fer est en quantité suffisante par rapport à l'azote et au phosphore. Il peut devenir limitant dans quelques régions très éloignées des côtes, ne recevant que de faibles apports de l'érosion continentale »<sup>47</sup>. Ce sont ces zones que l'on nomme HNLC. Le terme HN signifie que l'azote et le phosphore sont en quantité importante. Le terme LC signifie que la biomasse vivante (phytoplancton) est en faible quantité, du à un apport en fer trop faible.

En 2007, des analyses ont été réalisées dans la région sud-est du pacifique<sup>48</sup>. Le but était de déterminer quel type de phytoplancton réagit le mieux à un apport en fer<sup>49</sup> et ainsi savoir lequel se développe le mieux dans cette région du monde. Avant cette étude, il y avait jusqu'à présent très peu de données sur la localisation et les types de populations de phytoplanctons.

Une autre étude, réalisée en 2010, montre que la mer de Ross, située près le l'Arctique, présente la meilleure réponse à une fertilisation par le fer. Ce site permettrait de séquestrer le CO<sub>2</sub> de manière efficace car la glace empêche celui-ci de s'échapper durant la période hivernale. Par conséquence, une plus grande quantité de CO<sub>2</sub> est absorbée puis transportée par le phytoplancton vers le fonde de l'océan<sup>50</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Sean Low et al., n.d., *Geoengineering Policy and Gouvernance Issues*, p. 182, dans: T.Lenton et N.Vaughan, 2013, op.cit.

<sup>44</sup> K.Caldeira, G.Bala, L.Cao, 2013, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> John H. Martin, 1990, *Glacial-interglacial CO*<sub>2</sub> change: the iron hypothesis, Paleoceanography 5, pp. 1-13.

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> Philippe Bertrand, 2008, Les attracteurs de Gaïa, 304 p.

<sup>&</sup>lt;sup>\*′</sup> Ibid., p276

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> F. Gomez et al., 2007, Two High-Nutrient Low-Chlorophyll phytoplankton assemblages: the tropical central Pacific and the offshore Peru-Chile Current.

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> J.L Sarmiento et al., 2010, *Efficiency of small scale carbon mitigation by patch iron fertilization*.

Des modèles, comme le SRES A2, ont permis d'étudier les potentiels de puits de carbone pouvant être créés dans différentes régions océaniques de la planète<sup>51</sup>. Les résultats sont les suivants:

En 2100, le modèle SRES A2 prévoit une concentration de CO<sub>2</sub> de 985 ppm avec un pH de l'eau de mer de 7.74 unités au lieu de 8.18 avant la période industrielle, soit une perte de 0.44 unité. Avec utilisation de fertilisation par le fer (IOF<sup>52</sup>) dans l'océan, les études estiment que la concentration de CO<sub>2</sub> serait de « seulement » 833 ppm minimum avec une perte de pH de 0.38 unité (au lieu de 0.44), pour le meilleur scénario<sup>53</sup>,

Une autre estimation prévoit que 40% du CO<sub>2</sub> serait stocké dans l'océan avec mise en place de l'IOF, alors que seulement 27% le serait si l'IOF n'est pas appliquée<sup>54</sup>.

Les risques liés au développement de cette méthode sont les suivants:

- Augmentation des régions avec une concentration en oxygène plus faible.
- Production accrue de N<sub>2</sub>O.
- Perturbations des écosystèmes marins<sup>55</sup>.

A l'échelle du millénaire, la quantité d'extra carbone pouvant être stockée dans les océans grâce à l'IOF serait de 106 à 227 PgC<sup>56</sup>.

A petite échelle, l'expérimentation de fertilisation par le fer peut permettre d'améliorer les connaissances sur le rôle des nutriments dans les cycles biogéochimiques marins<sup>57</sup>. Mais à grande échelle, ce serait inefficace pour atténuer le changement climatique<sup>58</sup>.

#### 2.2.4 Augmentation de l'altération de roches silicatées dans les terres/océans

Le retrait de CO<sub>2</sub> par effritement des roches silicatées se fait sur une échelle de temps allant de quelques siècles à plusieurs millénaires<sup>59</sup>. Le rythme de retrait ne serait que de 0,3 PgC par an<sup>60</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> Ken Caldeira et Long Cao, 2010(b), Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification?

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> Iron Ocean Fertilisation.

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>54</sup> Ibid.

<sup>55</sup> Ibid

<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> Tim Lenton et Noemi Vaughan, 2009, *The radiative forcing potential of climate geoengineering*, pp. 5539-5561.

<sup>&</sup>lt;sup>57</sup> K.Caldeira et L.Cao, 2010(b), op. cit.

<sup>58</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> IPCC AR5, 2013, *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*, p. 550, dans: *Climate Change, The Physical Science Basis*, 2013.

<sup>60</sup> Ibid.

Si ce processus était reproduit et amélioré dans le but de capturer suffisamment de CO<sub>2</sub> pour atténuer le changement climatique, le potentiel maximal est estimé à 1 PgC par an. Ce ne serait pas suffisant pour avoir un réel impact sur les émissions de GES. De plus, ce procédé est également estimé comme long et coûteux<sup>61</sup>.

Mais les études au sujet de cette méthode ne proposent pas toutes les mêmes conclusions. Certains sont beaucoup plus optimistes quant au déploiement de cette technologie<sup>62</sup>. R.D Schuiling, du département des Sciences de la Terre de Utrecht aux Pays-Bas, précise que de plus en plus de gens pensent que cette technique est une des plus prometteuses et respectueuse de l'environnement. Selon lui, la plupart des scientifiques qui se prononcent à ce sujet estiment que le taux d'effritement est trop faible, car ils basent leurs calculs sur des tests faits en laboratoire. Or, il y a de fortes chances que ce taux soit plus élevé, voire beaucoup plus élevé sur le terrain. R.D Schuiling avance ainsi quelques exemples pour démontrer son hypothèse.

Le massif de dunite de Conakry en Guinée a un taux de météorisation (autre terme utilisé pour effritement de roches silicatées) de 2,6 µm par an, sur une période de 195 millions d'années. Au brésil, à Jacupiranga, le taux minimum de météorisation mesuré s'élève à plus de 3,1 µm par an. Ce taux est environ 10 fois supérieur au taux calculé en laboratoire.

La réaction principale de météorisation<sup>63</sup>, à la base de la capture du CO<sub>2</sub> est la suivante:

$$Mg_2SiO_4 + 4CO_2 \rightarrow 2 Mg^{2+} + 4HCO_3^- + H_4SiO_4$$

D'après lui, la précipitation en sédiments carbonés dans les fonds marins prend effectivement des millénaires, comme le soutiennent les autres scientifiques. Mais la première étape, qui est cruciale pour la capture du CO<sub>2</sub>, ne prend elle qu'une dizaine d'années. Pour qu'elle se produise, cette réaction a besoin de deux composants essentiels, le magnésium et le calcium, que l'on retrouve dans l'eau des rivières (proportions mesurées dans l'eau: Ca estimé à 11 ppm, Mg à 2,6 ppm et HCO3 à 42,6 ppm<sup>64</sup>), mais également dans l'olivine, roche silicatée présente en abondance dans la croûte terrestre<sup>65</sup>. R.D Schuiling a réalisé un calcul pour évaluer la quantité

<sup>61</sup> Ihid

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> R.D Schuiling, n.d., *Weathering Approaches to Carbon Dioxide Sequestration*, pp. 141-167, dans: T.Lenton et N.Vaughan, 2013, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup> Météorisation est le terme français pour désigner Weathering qui signifie effritement.

<sup>&</sup>lt;sup>64</sup> R.D Schuiling, n.d., op.cit.

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup> La proportion d'olivine dans la croûte terrestre est évaluée entre 0 et 3% du volume total. A ce sujet, l'annexe 3 donnent des renseignements sur la composition de la croûte terrestre.

d'olivine nécessaire pour séquestrer dans les océans la totalité des émissions anthropogéniques considérant les hypothèses suivantes:

- la mise en place de l'efficience énergétique, de technologies vertes et le changement dans notre façon de vivre évolue peu.
- les autres technologies permettant de retirer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sont négligeables.

Le résultat obtenu sur base de ce scénario, est une quantité d'olivine d'environ 7 km<sup>3</sup>. Evidemment, l'extraction d'olivine entrainerait également des émissions de GES. Il a estimé, sur base des moyens d'extraction actuels, que cette quantité d'énergie supplémentaire serait équivalente à 10 km<sup>3</sup> de pétrole. La quantité peut paraître importante, mais à titre de comparaison, certains excavateurs de pétrole aux Etats-Unis extraient chaque année un volume de 25 km<sup>3</sup>. L'objectif serait d'extraire l'olivine dans de nombreuses régions du monde, fractionner la matière en grains très fins, pour une dissolution rapide dans les océans.

Certains pays, qui pèsent à l'échelle mondiale, comme la Chine, le Brésil, l'Inde, l'Afrique du Sud et l'Indonésie, y voient là un intérêt tout particulier<sup>66</sup>.

Si l'hypothèse développée par R.D Schuilling est exacte, cette méthode, qui est une reproduction d'un processus naturel, est une des pistes de géo-ingénierie les plus prometteuses en termes d'atténuation du changement climatique.

#### 2.2.5 Correction de l'acidité de l'océan

Les océans de la planète ont absorbé environ 30% des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> depuis le début de l'ère industrielle<sup>67</sup>. En effet, les couches supérieures de l'océan échangent en permanence du dioxyde de carbone avec l'atmosphère. La concentration de CO<sub>2</sub> étant plus forte dans l'atmosphère ces derniers temps, les océans ont absorbé une quantité plus importante de CO<sub>2</sub>, ce qui conduit aujourd'hui à ce constat: les océans s'acidifient, de manière inégale entre les différentes régions du monde. Certains écosystèmes, comme les coraux par exemple, pourraient ne pas s'adapter à cette modification de leur environnement. Mais de plus, un océan plus acide

\_

<sup>&</sup>lt;sup>66</sup> R.D Schuiling, n.d., op.cit, dans: T.Lenton et N.Vaughan, 2013, op. cit.

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> IPCC AR5. 2013, Observation: Oceans, dans: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013.

absorbe moins de CO<sub>2</sub>. D'où l'idée de corriger son alcalinité en utilisant un procédé chimique bien maitrisé, le chaulage.

Le principe est simple: faire réagir des roches calcaires (C<sub>a</sub>CO<sub>3</sub>) avec l'eau de mer dans certaines zones bien identifiées<sup>68</sup>. D'après les études, un puits de carbone de 0.27 PgC par an pourrait être obtenu après un siècle, sur base d'une augmentation linéaire continue de l'activité<sup>69</sup>. Si l'activité est maintenue pendant 400 ans, cela pourrait réduire la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> d'environ 30 ppm, donnant un RF d'environ -0.36 W.m<sup>-2</sup> vers 2500. Cette opération de grande envergure nécessiterait une force navale importante, mais mobiliserait également l'extraction d'une grande quantité de roches, qu'il faudrait broyer en grain et transporter.

Si les énergies fossiles étaient utilisées pour ces opérations, le potentiel de cette méthode comme outil d'atténuation du CO<sub>2</sub> dans l'air baisserait substantiellement<sup>70</sup>. Mais cette technique pourrait être positive pour les écosystèmes marins, dans le cadre d'un maintient du niveau de pH acceptable des océans.

#### 2.2.6 Capture directe dans l'air

Alors que les cinq premières méthodes exposées se focalisaient sur l'intervention dans les écosystèmes, la capture directe dans l'air se classe dans la catégorie des solutions d'ingénieries.

Elle se définit par le captage du CO<sub>2</sub> directement dans l'air ambiant. Des procédés chimiques sont utilisés pour séparer le CO<sub>2</sub> de l'air. Le CO<sub>2</sub> ainsi capturé doit être transporté, puis vendu, ou stocké dans des réservoirs géologiques<sup>71</sup>. Du fait que la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air est de 400 ppm, soit 0,04%, celle des sorties de fumées des centrales électriques (à gaz ou à charbon) d'environ 10%<sup>72</sup>, il semble difficile pour la capture directe dans l'air de s'imposer économiquement face à la capture à la source de ces centrales électriques. Néanmoins, cette technique a l'avantage de pouvoir être installée dans toutes les régions du monde. Le prix exorbitant de l'ordre de 1000 \$ par tonne de CO<sub>2</sub><sup>73</sup> fait que cette méthode n'est pour l'instant absolument pas rentable pour atténuer le changement climatique. Mais il se pourrait que dans le

<sup>&</sup>lt;sup>68</sup> T.Lenton et N.Vaughan, 2011, op.cit., p. 754.

<sup>69</sup> Ihid

<sup>70</sup> Ibid

<sup>&</sup>lt;sup>71</sup> K.Caldeira, G.Bala, L.Cao, 2013, op.cit., p. 248.

<sup>72</sup> Ihid

<sup>&</sup>lt;sup>73</sup> Hans Joachim Schellnhuber, 2011, *Geoengineering: The good, the MAD and the sensible*.

futur, il soit plus rentable pour certains pays d'utiliser cette méthode plutôt que consentir des stratégies de réduction d'émissions<sup>74</sup>.

### Bio-énergie avec capture et stockage de carbone (BECCS)

Comme son nom l'indique, cette méthode est en fait la fusion de deux techniques distinctes:

- L'utilisation de la biomasse pour produire de l'énergie.
- La capture du CO<sub>2</sub> et sa séquestration dans les formations géologiques.

L'objectif de cette méthode est d'utiliser la biomasse comme substitution aux énergies fossiles, y associer la technique de capture et séquestration du carbone et ainsi produire des émissions négatives. En effet, lors de son développement, la biomasse (arbres, algues, plantes) utilise le CO<sub>2</sub> via la photosynthèse. Lors de sa combustion pour transformation en énergie, une partie du CO<sub>2</sub> utilisé pendant la phase de croissance est captée et stockée dans des formations hermétiques au cycle du carbone (formations géologiques ou aquifères salins).

« La capacité de cette méthode à générer des émissions négatives fournit un mécanisme pour une gestion active du CO<sub>2</sub> atmosphérique à un horizon très lointain, avec des conséquences sur les implications des politiques climatiques à long terme »<sup>75</sup>.

Certaines études estiment qu'une forêt tempérée typique combinée à un captage et un stockage à long terme, permettrait de retirer 2,5 tonnes de carbone par an et par hectare<sup>76</sup>. L'auteur précise que le système doit reposer sur une base durable. Il calcule que si 3% du total des terres du monde, soit le quart des surfaces agricoles, était utilisé pour retirer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère en utilisant cette méthode, il serait possible de retirer environ 1 PgC par an<sup>77</sup>. D'ici 2100, sur base du calcul précédent, de l'hypothèse que la surface nécessaire est directement utilisée et opérationnelle, un retrait d'environ 90 PgC est envisageable à la fin de ce siècle.

Le problème évident qui se pose reste la concurrence avec d'autres activités pratiquées, notamment l'agriculture.

<sup>&</sup>lt;sup>74</sup> K. Caldeira, G.Bala, L.Cao, 2013, *op.cit.*, p. 248.

<sup>&</sup>lt;sup>75</sup> David Keith, 2008, Biomass with capture: negative emissions within social and environmental constraints: an editorial comment, Springer, Climate Change, p. 325.

<sup>&</sup>lt;sup>76</sup> K. Caldeira, G.Bala, L.Cao, 2013, *op.cit.*, p. 246.

<sup>&</sup>lt;sup>77</sup> Ibid.

Mais certains économistes optimistes pensent toutefois que cette méthode pourrait être compétitive avec les procédés plus conventionnels de capture de CO<sub>2</sub>, ceux pratiqués sur les installations énergétiques à base d'énergie fossile<sup>78</sup>.

### 2.2.8 Synthèse

Le tableau 1 permet d'avoir une vue synthétique des méthodes expliquées dans les chapitres précédents. Les points suivants sont évalués dans le tableau:

- Efficacité.
- Coût.
- Rapidité de mise en œuvre.
- Echelle de temps de stockage de carbone.
- Sécurité.

La légende associée à ces paramètres est donnée figure 8:

	Légende
<b>&gt;</b>	Très faible
V	Faible
レレレ	Moyen
レレレレ	Elevé
<b>VVVVV</b>	Très élevé

Figure 8: Légende du tableau 1.

Des précisions sur le potentiel de retrait sur un siècle, la nature du procédé, le lieu de stockage et les risques associés sont également présentés.

Les valeurs présentées dans la catégorie « potentiel de retrait de CO<sub>2</sub> sur un siècle » ne doivent pas être considérées comme totalement exactes et fixes. La complexité au cas par cas de chaque technique rend la fiabilité des résultats très incertaine. D'ailleurs, pour l'IOF, il est donné deux potentiels très différents, suivant l'auteur qui a réalisé l'étude. Néanmoins, ces chiffres sont là pour donner une idée de ce qui serait possible de mettre en place en cas d'accélération du phénomène du changement climatique.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>78</sup> Ibid.

		Efficacité	ţ	Rapidité de	Rapidité de Echelle de temps	Cócuritó	Potentiel physique de	Notine di mangalè	ions de stantage	Dienie
			j	œuvre	Carbone	Securite	(valeurs du GIEC)		agevons an energia	canhea
	Afforestation et reforestation	3	,	~~	^^^	****	40-70 PgC	Biologique	Terres(biomasse, sols)	Altération de l'albédo de surface. Possible modification descycles hydrologiques.
	Bio-energie avec capture et stockage de carbone(BECCS)	****	***	***	****	^^^	125 PgC	Biologique	Sols	ldem
	Création de biochar et stockage dans le sol	3	***	3	****	***	130 PgC	Biologique	Sols	Idem
Méthodes CDR	Fertilisation de l'océan par le fer	3	***	3	^^^^	,	16-60 PgC 280 PgC	Biologique	Océans	Expansion des régions avec faible concentration d'oxygène. Emissions N <sub>3</sub> O accrues. Altération de la production de sulfrue de diméthyle et de gaz à effet de serre autre que le CO <sub>2</sub> . Perturbations possibles sur les écosystèmes manins et les cycles de carbone régionaux.
	Augmentation de l'altération de roches silicatées dans les terres	3	>	,	*****	^^^	100 PgC	Chimique	Océans et sols	Augmentation du pH des sols et des rivères localement. Effets sur les écosystèmes d'eau douce et terrestre
	Capture directe dans l'air	****	****	**	****	*****	Pas de limite définie	Chimique	Océans/formations géologiques	Inconnus
	Correction de l'acidité de l'océan	3	\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\	}	~~~~	^^^	Pas de limite définie	Chimique	Océans/formations géologiques	Inconnus

Tableau 1: Vue synthétique des méthodes CDR. Tableau inspiré du document réalisé par ecoconso et adapté grâce aux diverses recherches dans la littérature existante.

Il est important de rappeler que cette liste est non exhaustive. Les études sur l'ingénierie du climat étant récentes, de nouvelles idées, mais aussi le développement de la recherche dans ce domaine laissent à penser que d'autres techniques devraient voir le jour dans les décennies à venir. Le GIEC rappelle qu'un effet "rebond" et une inertie thermique sur le climat sont associés à toutes les méthodes de CDR<sup>79</sup>.

Le principal effet « rebond » lié aux méthodes CDR est le suivant: si nous parvenons à retirer la totalité de CO<sub>2</sub> émis durant la période industrielle, en y associant un mode de vie n'émettant aucun GES, la température globale à la surface de la Terre resterait supérieure d'au moins 2°C à la période préindustrielle. La figure 9 représente l'évolution de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère pour les hypothèses suivantes<sup>80</sup>:

- 1- Aucune émission de GES sans retrait de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.
- 2- Aucune émission de GES avec un retrait de toutes les émissions de CO<sub>2</sub> anthropogéniques en une fois, effectué en 2050.
- 3- Aucune émission de GES et maintient du niveau de CO2 dans l'atmosphère au niveau préindustriel.

Entre 1800 et 2008, le modèle est forcé avec les observations réelles de concentration de CO<sub>2</sub>. A partir de 2009, le modèle est forcé sur base du scénario SRES A2.

<sup>&</sup>lt;sup>79</sup> IPCC AR5, 2013, Carbon and Other Biogeochemical Cycles, dans: Climate Change, The Physical Science Basis,

<sup>&</sup>lt;sup>80</sup> Ken Caldeira et Long Cao, 2010(a), Atmospheric Carbon Dioxide Removal: Long-Term Consequences and Commitment.

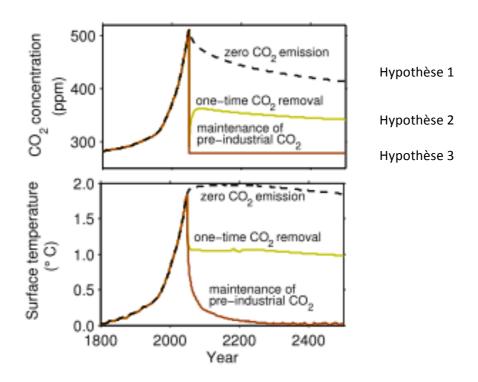


Figure 9: Effets « rebonds » lié à un retrait du  $CO_2$  anthropogénique en une fois. Source: K.Caldeira et L.Cao, 2010(a).

Pour maintenir une concentration de CO<sub>2</sub> équivalente au niveau préindustriel, il ne suffirait pas de retirer tout le CO<sub>2</sub> accumulé dans l'atmosphère, il faudrait également retirer le CO<sub>2</sub> qui serait transféré par les océans et les sols vers l'atmosphère.

### 2.3 Méthodes de gestion du rayonnement solaire

La terre reçoit environ 242 W.m<sup>-2</sup> d'énergie lumineuse par jour. Les études estiment que le doublement de la concentration en CO<sub>2</sub>, par rapport au niveau de concentration préindustriel, aurait pour conséquence une augmentation du forçage radiatif d'environ 4 W.m<sup>-2</sup>. Cela signifie que pour retrouver un forçage radiatif équivalent à la période préindustrielle, il faudrait réduire l'énergie solaire reçue d'environ 4/242, soit environ 1,7 %<sup>81</sup>. Réduire l'énergie solaire de 1,8% correspondrait une augmentation de l'albédo global de 30% à 31-31,5%<sup>82</sup>.

A cause de leur coût très bas, les motivations à essayer les méthodes SRM sont fortes. En comparaison à ces coûts relativement faibles, atténuer le changement climatique en réduisant les

<sup>&</sup>lt;sup>81</sup> K.Caldeira, G.Bala, L.Cao, op.cit., 2013.

<sup>&</sup>lt;sup>82</sup> Michael MacCracken, 2009, On the Possible Use of Geoengineering to Moderate Specific Climate Change Impacts, p. 3.

émissions de GES requiert une coopération internationale sans précédent et des coûts substantiels.

D'après certaines estimations<sup>83</sup>, le changement climatique pourrait coûter à un pays comme les Etats-Unis la somme de 83 milliards de dollars en valeur monétaire du présent. Suivant l'hypothèse que les Etats-Unis décident de stopper net leurs émissions, ils réduiraient quelques peu les dégâts mais ils ne solutionneraient pas le problème. Si maintenant, les Etats-Unis se décident à utiliser une des méthodes SRM, cela ne leur coûterait presque rien. Et ils pourraient (selon des hypothèses qui restent encore à démontrer) éliminer une des conséquences de l'augmentation des GES: le réchauffement à la surface de la Terre. Si la géo-ingénierie est aussi peu chère qu'annoncée, alors pourquoi les Etats-Unis, ou d'autres pays, ne préfèreraient-ils pas l'utiliser en lieu et place de la réduction des émissions?

### 2.3.1 Aérosols stratosphériques

Cette idée provient de Mr Paul Crutzen, prix Nobel de chimie, qui a proposé d'imiter ce que l'éruption d'un grand volcan comme le Mont Pinatubo peut provoquer. En 1991, l'éruption du Mont Pinatubo a provoqué un refroidissement de la Terre de 0,5° pendant une année. La quantité de sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) relâchée, 6 TgS, a permis un forçage radiatif de - 4,5 W.m<sup>-2 84</sup>.

Son idée est de reproduire ce phénomène naturel en envoyant dans la stratosphère une quantité suffisante de sulfure d'hydrogène pour atteindre le même effet. D'après lui, la quantité d'H<sub>2</sub>S devrait être beaucoup moins importante pour un résultat équivalent. L'avantage de placer des aérosols soufrés dans stratosphère est qu'ils peuvent y rester entre 1 et 2 ans, alors qu'ils ne résistent qu'une semaine dans la troposphère<sup>85</sup>.

Pour contrecarrer les effets du changement climatique, il propose un déploiement continu de 1 à 2 TgS par an, pour un coût qu'il estime entre 25 et 50 milliards de dollars. D'autres ont estimé que l'utilisation d'aérosols soufrés, afin de compenser l'effet de réchauffement de la totalité des émissions de CO<sub>2</sub>, devrait coûter seulement 8 milliards de dollars par an<sup>86</sup>.

\_

<sup>83</sup> Ihid n 50

<sup>&</sup>lt;sup>84</sup> Paul Crutzen, 2006, Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: a contribution to resolve a policy dilemma.

<sup>85</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>86</sup> Scott Barrett, 2007, *The Incredible Economics of geoengineering*, p. 49.

Un argument qui va en faveur de la mise en place de cette méthode est, qu'actuellement, sans que cela soit voulu, les aérosols fabriqués et utilisés au quotidien, ont paradoxalement un effet refroidissant sur la planète. D'après les estimations, cela représente tout de même 25 à 65% du réchauffement climatique qui est compensé par cette pollution de basse altitude<sup>87</sup>. Ainsi, si nous planifions de supprimer totalement ces aérosols émis quotidiennement dans la troposphère, car ils présenteraient d'autres dangers, le réchauffement planétaire serait automatiquement plus important.

De plus, un dernier argument avancé en faveur de leur déploiement serait que les particules, ainsi placées dans la stratosphère, auraient aussi un effet d'atténuation des rayons UV<sup>88</sup>. Cela serait bénéfique pour la population: moins de cancers de la peau, donc moins de dépense de santé pour la société.

Cela pourrait fonctionner, mais comme le rappelle le GIEC, encore trop peu d'études ont été effectuées sur ce sujet.

De plus, la détérioration de l'ozone stratosphérique est un des effets secondaires négatifs problématique. Lors de l'éruption d'El Chicón, environ 3 à 5 TgS avaient été rejetés dans l'atmosphère. Suite à ça, une destruction de 16% de l'ozone stratosphérique avait été constatée à 20 km d'altitude<sup>89</sup>.

On doit se poser la question suivante par rapport à l'utilisation de cette technique: quelles seraient les conséquences à long terme de sa mise en place à grande échelle? Paul Crutzen milite pour la poursuite de la recherche, l'investigation des modèles et la mise en place de tests atmosphériques étapes par étapes, à petite échelle. Mais, même en ayant toutes les informations de nombreux modèles et une parfaite connaissance du phénomène à petite échelle, est-il possible de maitriser un environnement aussi grand et complexe de l'atmosphère terrestre?

Techniquement, cette méthode pourrait fonctionner, mais elle aurait comme conséquence d'enclencher une dépendance vis-à-vis de la continuité du processus. Il est estimé que si le programme venait à être brutalement arrêté, le réchauffement à la surface du globe serait

<sup>&</sup>lt;sup>87</sup> Voir figure 3: bilan du forçage radiatif, § 1.2.1.

<sup>88</sup> Ihid

<sup>&</sup>lt;sup>89</sup> Paul Crutzen, 2006, *op. cit.*, p. 215.

beaucoup plus rapide qu'il ne l'est aujourd'hui<sup>90</sup>. Cela pourrait condamner un grand nombre d'écosystèmes, qui seraient incapables de s'adapter à une augmentation de température trop rapide. La figure 10 illustre cette hypothèse. Le graphique (A) représente l'évolution de la température à la surface du globe suivant le modèle « business as usual ». Le graphique « B » montre ce qu'il serait susceptible de se passer si cette méthode était appliquée à partir de 2020, jusqu'en 2059, avec un arrêt brutal du programme à cette date. Les différentes courbes, suivant les couleurs, sont basés sur les scénarios SRES du GIEC.

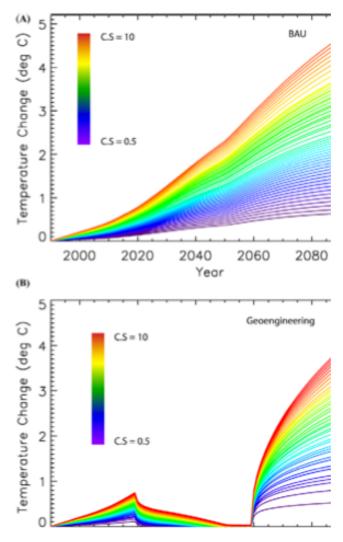


Figure 10: (A) Evolution de la température par rapport à 1990 pour le scénario « business as usual »; (B) Le cas où la géo-ingénierie serait appliqué de 2020 à 2059, puis brusquement arrêtée. Source : A.Ross et H.D Matthews, 2009, Climate engineering and the risk of rapid climate change, p3.

 $<sup>^{90}</sup>$  Andrew Ross et H Damon Matthews, 2009, Climate engineering and the risk of rapid climate change, p. 2.

Le modèle utilisé est le modèle MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-gas-Induced Climate Change). Il a été un des premiers modèles utilisés par le GIEC<sup>91</sup>. Ce modèle souligne l'incertitude des interventions de ce type.

#### 2.3.2 Miroirs réfléchissants dans l'espace

Cette idée qui peut paraître un peu surréaliste, provient du chercheur américain Roger Angel, de l'Université d'Arizona. L'objectif ici est de réduire l'influence des rayons du soleil à grande échelle. Pour cela, Roger Angel propose de positionner des milliers de petits écrans filtrants à une distance de 1.5 millions de kilomètres de la Terre. Cette distance correspond à un des « points de Lagrange», représenté par le point L1 sur la figure 11. Les points de Lagrange correspondent à des positions bien précises de l'espace où se combinent les champs gravitationnels de deux corps, de manière à fournir un point d'équilibre à un troisième corps, dont la masse est négligeable par rapport aux deux premiers.

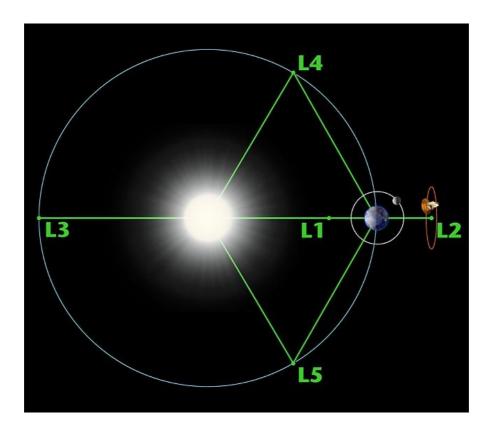


Figure 11: Point de Lagrange. Source: Nasa-Wmap Science Team.

<sup>&</sup>lt;sup>91</sup> Ibid., p. 2.

D'après R.Angel, ces panneaux, ainsi positionnés, pourraient permettre de réduire le flux d'énergie solaire d'environ 1,8%, compensant ainsi le réchauffement du au doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> par rapport à l'ère préindustrielle. Malgré ces promesses, le coût resterait toutefois substantiel car, d'après les études réalisées, une surface de 2 millions de km² est nécessaire pour réduire l'actuel surplus d'énergie solaire, qui est d'environ 1,6 W.m². Etant donné que cette valeur augmente à un rythme de 2 ppm par an, il faudrait ajouter 36 000 km² de panneaux tous les ans. Cela correspondrait à 155 000 lancements par an, contenant chacun 800000 de ces panneaux<sup>92</sup>. Une estimation du poids a été évoquée: 20 millions de tonnes à propulser vers l'espace<sup>93</sup>. A l'heure actuelle et dans l'état actuel des technologies, cette technique n'est pas envisageable. De plus, il y aura également un effet secondaire: modification des cycles hydrologique, avec une baisse des précipitations pouvant atteindre 2%.

#### 2.3.3 Eclaircissement des nuages terrestres/marins

Il existe une différence fondamentale entre cette méthode et les deux précédentes. Au lieu de réduire la force des rayons du soleil arrivant jusqu'à la Terre, la méthode permet d'agir sur l'énergie renvoyée par celle-ci. Les océans ont un albédo très faible, ce qui en fait une cible de choix pour influencer l'albédo total terrestre.

Le principe de base est d'améliorer la réflectivité des nuages marins de basse altitude (stratocumulus) en augmentant le nombre de condensation nucléique des nuages (CCN)<sup>94</sup>. Un nombre de CCN plus important provoque une augmentation du nombre de gouttelettes dans le nuage, mais réduit également leurs tailles. La conséquence est une augmentation de la réflectivité du nuage.

Certaines régions de la planète ont ainsi été identifiées comme ayant le meilleur potentiel pour le déploiement de cette technique. Ainsi, les côtes telles que l'Ouest des Amériques du Nord au Sud ou l'Ouest de l'Afrique, seraient des régions du monde où l'éclaircissement des nuages marins serait efficace<sup>95</sup>.

32

<sup>&</sup>lt;sup>92</sup> T.Lenton et N.Vaughan, 2011, op. cit., p. 762.

<sup>93</sup> C.Hamilton, 2013, op.cit.

<sup>&</sup>lt;sup>94</sup> K. Caldeira et L.Cao, 2013, *op.cit.*, p. 239.

<sup>95</sup> Ibid.

D'après une étude, il a été estimé qu'un doublement de la concentration du nombre de gouttelettes dans les régions identifiées pourrait suffire à compenser approximativement le RF du à un doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère<sup>96</sup>.

### 2.3.4 Amplification de l'albédo de surface

#### 2.3.4.1 Dans les terres

En termes purement physiques, l'approche utilisée ici est la même que celle utilisée pour la méthode d'éclaircissement des nuages: l'objectif est d'augmenter l'albédo d'une surface donnée. Mais contrairement à cette dernière, il existe une différence fondamentale dans l'approche de cette méthode. En effet, la modification de l'albédo de surface mobilise peu de technologie et se base principalement sur des efforts volontaires d'acteurs locaux plutôt qu'un effort centralisé des institutions gouvernementales<sup>97</sup>.

Robert M. Hamwey présente deux scénarios: le scénario 1 concerne l'amélioration de l'albédo des constructions humaines, le scénario 2 concerne l'amélioration de l'albédo des prairies.

#### Scénario 1:

Il a réussi à calculer, selon certaines hypothèses, la quantité de surfaces « blanchissables » par habitant. Il y a 20 ans, il estimait ce chiffre à 46 m<sup>2</sup> de surface urbaine par habitant<sup>98</sup>. En 2003, le département de l'agriculture des Etats-Unis (USDA) a déterminé que les Etats-Unis possédaient le plus grand potentiel au monde, avec une capacité de 1500 m<sup>2</sup> par habitant.

Il ajoute qu'en moyenne, chaque mètre carré pourrait avoir un albédo doublé, passant ainsi de 0.15 à 0.3. Suivant ce scénario, le forçage radiatif global pourrait être diminué de 0.17 W.m<sup>-2</sup>.

### Scénario 2:

Toujours d'après R.M. Hamwey, la possibilité d'améliorer l'albédo de certaines surfaces en y faisant pousser des plantes ayant un grand pouvoir réfléctant est considérable. Pour donner un exemple, parmi les premiers choix de R.Hamwey se trouveraient la Carex hachijoensis et la Chlorophytum comosum. Ces plantes ont la particularité d'avoir des feuilles de différentes

<sup>&</sup>lt;sup>97</sup> Robert M. Hamwey, 2007, *Active amplification of terrestrial albedo to mitigate climate change*, p2.

<sup>&</sup>lt;sup>98</sup> Ibid., p5.

couleurs, parfois tâchées ou rayées. Cela permet d'augmenter le pouvoir réflèctant jusqu'à 60%<sup>99</sup>.

Il identifie 3 types de surfaces terrestres susceptibles de répondre à l'application de cette méthode. Ces 3 surfaces (friches ouvertes, prairies, savanes) ont été sélectionnées parmi les surfaces décrites dans le Programme International Géosphère-Biosphère. Elles couvrent à elles seules environ 30% de la surface terrestre totale 100.

Considérant que 30% de la surface totale des terres de la planète puisse voir son albédo augmenter, il calcule que le forçage radiatif pourrait être diminué de 0.59 W.m<sup>-2</sup>. Néanmoins. il dit qu'il faudra certainement appliquer un coefficient correcteur à cette estimation.

D'autres chercheurs, de l'Université de Bristol, sont arrivés à la conclusion que l'augmentation de l'albédo par le choix de certaines plantes plus réflectives pourrait conduire à un refroidissement supérieur à 1°C sur la période estivale, pour une grande partie de l'hémisphère Nord<sup>101</sup>. Ils affirment que cette méthode pourrait être une alternative crédible pour l'atténuation du changement climatique. Mais ils pensent également que cette méthode a une efficacité limitée à l'échelle mondiale, qu'elle ne peut se substituer à l'impératif de réduction des émissions.

Dans l'ensemble, ils pensent que cette méthode, qu'ils nomment « bio-ingénierie », peut « jouer un rôle en tant que mesure temporaire pour réduire la gravité des impacts sur l'agriculture et la santé, dus aux fortes vagues de chaleur dans le Nord industrialisé »<sup>102</sup>.

Le GIEC rappelle que la faisabilité de cette méthode reste incertaine et qu'il reste à déterminer les possibles effets secondaires sur la photosynthèse, la biodiversité et l'absorption du carbone<sup>103</sup>.

#### 2.3.4.2 Dans les océans

Les océans recouvrent environ les deux tiers de la surface de la planète et possèdent un albédo très faible dû à leurs couleurs sombres. Ces deux paramètres font que la surface des océans absorbe environ 93% du total de la radiation solaire arrivant sur la Terre<sup>104</sup>. Ceci a pour

<sup>&</sup>lt;sup>99</sup> Ibid., p10.

<sup>&</sup>lt;sup>100</sup> Ibid., p7.

<sup>&</sup>lt;sup>101</sup> Andy Ridgwell et al., 2009, *Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-geoengineering*, p149.

<sup>&</sup>lt;sup>102</sup> Ibid.,p149.

<sup>&</sup>lt;sup>103</sup> IPCC AR5, 2013, Carbon and Other Biogeochemical Cycles, dans: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013. p. 628.

<sup>&</sup>lt;sup>104</sup>Russell Seitz, 2011, *Bright water: hydrosols, water conservation and climate change.* 

conséquence que la moindre augmentation minime de l'albédo des océans aurait le potentiel d'influencer l'albédo total de la Terre de manière significative.

Afin d'améliorer l'albédo des océans, il a été proposé d'ajouter des microbulles réflectives sur une large zone des océans. La durée de vie des microbulles, donc l'échelle à laquelle elles peuvent être appliquées, dépendent de la loi de Stoke, de l'influence de l'air ambiant et des agents tensioactifs ajoutés<sup>105</sup>. D'après les calculs, ces microbulles peuvent augmenter l'albédo de manière significative, même à des concentrations volumiques de l'ordre de quelques parties par millions. Cela correspondrait à un coût énergétique d'un joule par mètre carré pour la phase d'initiation et d'un mW.m<sup>-2</sup> pour la phase dit « durable »<sup>106</sup>. Augmenter l'albédo des océans de cette manière conduirait à une réduction d'énergie solaire absorbée de l'ordre de 100 W. m<sup>-2</sup>.

Mais la faisabilité de ce projet reste à démontrer car, d'après le GIEC, ni la persistance des microbulles dans l'océan, ni les potentiels effets secondaires sur la circulation océanique ou les écosystèmes marins n'ont encore été évalués<sup>107</sup>.

## 2.4 Synthèse

Le tableau 2 permet d'avoir une vue synthétique des méthodes expliquées dans les chapitres précédents. Les points suivants sont évalués dans ce tableau:

- Efficacité.
- Coût.
- Rapidité de mise en œuvre.
- Sécurité.

La légende associée à ces paramètres est donnée figure 12.

	Légende
~	Très faible
VV	Faible
VVV	Moyen
レレレレ	Elevé
レレレレレ	Très élevé

Figure 12: Légende du tableau 2.

106 ..

<sup>105</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>107</sup> IPCC AR5, 2013, *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*, dans: *Climate Change, The Physical Science Basis*, 2013.

			Efficacité	Coût	Rapidité de mise en œuvre	Sécurité	Nature du procédé	Risques probables
	Aerosols	stratos phériques	vvv	v	VVV	St dépe		Destruction de l'ozone stratosphérique, dépendance vis-à-vis de la continuité dans le temps du processus
5		fléchissants dans l'espace	VVV	vvvv	<i>\\\\\</i>	~	Technologique	Diminution de la photosynthèse
s SRM	Eclaircisse	ment des nuages	VVV	<b>///</b>	VVV	~	Chimique	Perturbation des cycles météorologiques
Wéthodes	o de	Dans les terres (scénario 1)	~	<b>///</b>	VVV	<b>VVVV</b>	Technologique	Aucun
Mé	Amplification de l'albédo de surface	Dans les terres (scénario 2)	VVV	vvv	VV	vvv	Biologique	Concurrence avec d'autres activités, effets secondaires possibles sur biodiversité et photosynthèse
	Amplifica	Dans les océans	VVV	VVV	VVV	v	Technologique	Possibles effets secondaires sur les ecosystèmes et la circulation des océans

Tableau 2: Vue synthétique des méthodes SRM. Tableau inspiré du document réalisé par ecoconso et adapté grâce aux diverses recherches dans la littérature existante.

L'injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère ressort comme la technique la plus abordable en terme de coût. Elle pourrait être mis en place par un seul pays, voire même par un individu suffisamment riche. Mais les effets secondaires et « rebonds » associés devraient être plus dissuasif qu'un coût abordable.

Ensuite, l'amplification de l'albédo de surface, correspondant au scénario 1(§.2.3.4.1), est une technique dont le coût est également peu élevé. Mais l'efficacité d'une telle méthode est très limitée et également très longue à mettre en œuvre. Le scénario 2 de cette méthode pourrait être plus efficace, mais la concurrence des terres avec d'autres plantes la rend très incertaine en terme de potentiel.

Enfin, l'éclaircissement des nuages marins se situe dans la moyenne, en termes de coût et d'efficacité. La recherche à ce sujet se poursuit. Mais les effets indésirables sur les cycles climatiques inspirent la prudence.

Dans l'ensemble, les techniques SRM sont moins chères que les techniques CDR présentées dans le tableau 1. Mais elles présentent également des risques plus grands. L'injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère est tout de même la piste ayant le plus de chance de se développer un

jour. Mais l'effet « rebond » (expliqué au chapitre 2.3.1) met en garde par rapport aux conséquences pouvant être très problématiques, en cas d'arrêt brutal du programme.

## 2.5 Financement, gouvernance, éthique de l'ingénierie du climat.

D'un point de vue économique, les méthodes de gestion du rayonnement solaire (SRM) requièrent un investissement financier relativement limité. Elles peuvent être mises en place par un seul pays. Un pays comme les Etats-Unis, qui possède des richesses et des moyens techniques presque illimités comparés à l'estimation du coût de géo-ingénierie, pourrait tout à fait envisager de tester certaines méthodes SRM.

D'un point de vue du financement de la recherche, Bill Gates est à ce jour le plus grand contributeur. Il possède des parts dans la société Carbon Engineering Ltd, créé par David Keith<sup>108</sup>. Cette société développe la technologie de capture directe dans l'air. Il est également associé à Ken Caldeira, au travers de la société Intellectual Ventures, qui a été fondée par des anciens salariés de Microsoft. Cette société a déposé un brevet nommé « Strato Shield », dans le but d'inverser le réchauffement en Antarctique. Enfin, il finance la société Silver Lining, qui est spécialisée dans la recherche sur les techniques d'éclaircissements des nuages marins<sup>109</sup>.

Un autre investisseur, Murray Edwards, qui a fait fortune dans l'exploitation des sables bitumeux de l'Alberta, apporte également un soutien financier à la recherche, dans le domaine de capture directe de CO<sub>2</sub> dans l'air<sup>110</sup>. Là encore, les technologies développées font l'objet d'un brevet. A ce sujet, l'argument avancé pour justifier la dépose de brevet pour toutes les technologies actuellement en phase de recherche, est qu'il serait dangereux de laisser « n'importe qui » s'approprier ces technologies<sup>111</sup>. D'après eux, le brevet est la manière la plus fiable de « privatiser la technologie » mais également le meilleur moyen de communiquer sur les détails techniques. A ce jour, le *Limermont Institute* aurait déposé 20 000 brevets sur le thème de la géoingénierie<sup>112</sup>.

Le lien entre le monde des affaires et la recherche en géo-ingénierie est bien réel. Ce sont parfois les mêmes personnes qui critiquaient l'exactitude des conclusions du GIEC sur le changement

<sup>&</sup>lt;sup>108</sup> C.Hamilton, op.cit., pp. 104-107.

<sup>&</sup>lt;sup>109</sup> Ibid.

<sup>110</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>111</sup> Ibid.

<sup>112</sup> Ibid.

climatique il y a encore peu de temps, qui aujourd'hui financent la recherche sur la géoingénierie.

La méconnaissance des politiques à ce sujet et l'absence d'organisme de décision mondial sur le climat, favorisent un développement non encadré de la recherche sur ce thème.

Le débat sur la gouvernance de tels projets soulèvent également des questions éthiques. En effet, ceux qui décideraient d'utiliser ou non l'ingénierie du climat, auraient entre leurs mains un pouvoir très grand. Etant donné que les projets se passe à très grande échelle, l'entièreté de la population se trouverait impactée par les effets du l'ingénierie du climat<sup>113</sup>. Sean Low le compare une expérimentation médicale, qui serait administré à la totalité de la population, dans le but d'éviter un problème plus grave. Mais, dans le cas d'une expérimentation médicale, le consentement du patient est requis pour administrer le traitement. Dans le cas de la géoingénierie, il serait très difficile d'obtenir le consentement de l'entièreté de la population, sachant que les effets secondaires existent. De plus, toute une partie de la population pensent que le changement de comportement est la seule solution possible et ne crois pas à la solution technique<sup>114</sup>. D'autant plus que le problème à résoudre vient en grande partie du développement de la technique elle-même.

#### 2.6 Discussion

Les méthodes de géo-ingénierie envisagées, expérimentées pour certaines, doivent être perçues comme deux types d'interventions distinctes. Les méthodes CDR visent à casser la relation qui existe entre les émissions de CO<sub>2</sub> ou autre GES et leur accumulation dans l'atmosphère ou les océans. Les méthodes SRM visent à briser le lien existant entre le CO<sub>2</sub> et autres GES déjà accumulés dans la biosphère et le réchauffement climatique qui en découle<sup>115</sup>.

Ces méthodes, bien que techniquement faisables pour certaines, ne doivent pas être considérées comme des solutions miracles face au changement climatique. La meilleure option que nous avons reste toujours le changement des comportements vis-à-vis de notre relation à la consommation de biens et de services et leur association à la définition du bonheur, mais également l'efficience énergétique, basée sur une production d'énergie propre et des technologies bas carbone. Mais cela prend du temps et les pouvoirs publics, reconnaissant pour

\_

<sup>&</sup>lt;sup>113</sup> Sean Low, n.d., *Geoengineering policy and governance issues*, dans: T.Lenton et N.Vaughan, 2013, op.cit.

<sup>114</sup> Ihid

<sup>&</sup>lt;sup>115</sup> K.Caldeira, G.Bala, L.Cao, 2013,op.cit.

la plupart que le problème est sérieux et urgent, pensent également qu'une solution simple pour répondre à ce problème n'existe pas.

Les conséquences d'un réchauffement important de la planète auraient des répercutions importantes, pour la plupart négatives. Ainsi, si l'hypothèse d'un réchauffement de 5° à la fin du siècle venait à se confirmer, nous serions probablement obligés d'utiliser la géo-ingénierie. Cela pourrait être l'injection d'aérosols soufrés dans la stratosphère, alimenté régulièrement grâce à une flotte d'avions, ou des microbulles dans l'océan pour refléter plus de lumière solaire, alimentés régulièrement grâce à un bataillon de navires.

Pour l'instant, le système climatique mondial est relativement stable, mais que se passerait-il si le réchauffement déclenchait la fonte du pergélisol situé dans l'hémisphère Nord? En effet, ces zones renferment de grandes quantités de méthane emprisonnées dans la glace, qui pourraient être relâchées si la température nécessaire était atteinte<sup>116</sup>.

Le système climatique est complexe et non-linéaire: C'est-à-dire que les modifications d'un paramètre ne se traduisent pas forcément par l'évolution proportionnelle de paramètres associés. Si le réchauffement devenait trop important, les conséquences seraient difficiles à prévoir. En ce sens, il devient rationnel d'explorer les pistes de géo-ingénierie susceptibles de contrecarrer des effets non désirables et peut être irréversibles, qui pourraient se produire dans le futur. Sur base d'un pur calcul économique, Scott Barrett affirme d'ailleurs que la géo-ingénierie l'17 sera utilisée dans le futur, « on peut en être presque sûr » dit-il.

Cela amène à se poser les questions suivantes: Qui devrait décider d'appliquer certaines méthodes SRM? Est-ce qu'un seul pays a le droit de mettre en place de telles actions? Et si oui, y aurait-il des perdants et des gagnants? Pour aller encore plus loin, pourrait-il se produire un jour une « guerre climatique » à cause des effets secondaires de la géo-ingénierie?

Admettons que les Etats-Unis mettent en place la technologie qui permette d'augmenter la réflectivité des nuages, que la conséquence soit une baisse de précipitation importante lors de la mousson indienne. Que se passerait-il alors? Ou si par exemple, la destruction de l'ozone stratosphérique à cause de l'injection d'aérosols soufrés soit plus important que calculée en

\_

<sup>&</sup>lt;sup>116</sup> L'estimation donnée par le GIEC est une quantité d'environ 1700 PgC (voir annexe 4), soit plus de 200 fois ce que nous rejetons chaque année.

<sup>117</sup> Sous-entendu « les méthodes de gestion du rayonnement solaire ».

laboratoire? L'équilibre est plus fragile qu'il n'y paraît. Il semble raisonnable, au nom du principe de précaution, de ne pas agir trop précipitamment dans le développement de telles techniques.

De nombreuses questions sont encore sans réponses. La recherche sur ce thème doit être poursuivie, mais elle ne doit pas être la propriété d'un seul pays, ni de quelques scientifiques ou hommes d'affaires ayant déposé des brevets.

Aujourd'hui, la grande majorité des scientifiques s'accordent sur le fait qu'il faut réduire les émissions de GES. La technologie CCS, examinée dans le chapitre 3, s'inscrit dans cet effort de réduction.

# 3 La Capture et le Stockage du CO<sub>2</sub> (CCS)

La technologie de capture et stockage du carbone (CCS) est la méthode d'atténuation du changement climatique la plus évoquée au niveau politique, notamment au niveau européen, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes présentées dans le chapitre 2. Elle a le soutien des acteurs (Industries, ONGs, Gouvernements, Instituts de recherche), notamment en Europe, mais le soutien du grand public reste à encore à être conquis<sup>118</sup>.

La technique CCS mérite un chapitre à part. Elle ne peut pas être réellement considérée comme une technique de géo-ingénierie car elle n'influence pas directement le forçage radiatif de la planète. Elle n'a également aucune influence sur la quantité de CO<sub>2</sub> anthropique déjà accumulée dans l'atmosphère. Mais si l'on part de l'hypothèse que de nouveaux GES vont être ajoutés dans l'atmosphère, de multiples manières, notamment par le biais de la production d'énergie à base de ressources fossiles, nous pouvons admettre que la technologie CCS éviterait qu'ils soient ajoutés. De par cette vue de l'esprit, on peut admettre que la technologie CCS retire le CO<sub>2</sub> « non encore émis » et pourrait être considérée comme une technique de géo-ingénierie, suivant interprétation. La technologie CCS ne contribue pas à retirer un gaz à effet de serre de l'atmosphère, ou plus largement, réduire les effets du au changement climatique. Par contre, elle permet de découpler la production énergétique à base de charbon ou de gaz des émissions associées de GES. L'objectif ici est de minimiser l'impact de l'utilisation d'énergie fossile en émettant moins de CO<sub>2</sub>, car il serait stocké dans des aquifères salins, ou dans des poches de gaz, ou de pétrole, vides.

Certains estiment que le CCS va permettre de gagner du temps, afin de développer en parallèle les énergies renouvelables, l'efficience énergétique et le changement des comportements, qui sera lent.<sup>119</sup>

Mais d'autres pensent que le développement du CCS va renforcer « l'effet lock-in » de l'accès à l'énergie, en favorisant des installations supplémentaires pour justifier le mode de fonctionnement en cours, basé sur un recours majeur aux énergies fossiles. Ils pensent que cela

<sup>118</sup> Klaas Van Alphen, 2007, Societal acceptance of carbon storage technologies, Netherlands, p 4368-4380

aura pour conséquence un ralentissement du développement des énergies renouvelables et ralentira encore davantage le changement des comportements<sup>120</sup>.

Dans ce chapitre nous essaierons de répondre à la question suivante: Quelles sont les conditions de succès de développement de cette méthode? Nous aborderons le sujet d'un point de vue technique, économique, écologique et social.

## 3.1 Approche technique

Techniquement, la technologie CCS est composée des opérations suivantes, dans l'ordre où ces opérations sont effectuées:

- Captage du CO<sub>2</sub>
- Transport
- Stockage dans des formations géologiques

Dans les sous-chapitres suivants, nous donnerons un bref aperçu du procédé industriel, sans rentrer dans les détails trop techniques.

#### **3.1.1** Captage

L'opération de captage est la première étape de la technologie CCS. Le CO<sub>2</sub> contenu dans les gaz, produits par la combustion de ressource fossile, doit être séparé des autres. Trois procédés existent pour mener à bien cette opération.

Le premier, la postcombustion, permet de capter les fumées qui se dégagent du brûlage d'un combustible. Il permet d'extraire entre 75 à 95% du CO<sub>2</sub> présent dans ces fumées<sup>121</sup>. Le flux de CO<sub>2</sub> ainsi obtenu serait pur à 99%.

Le second est la précombustion. Comme son nom l'indique, l'opération de séparation du CO<sub>2</sub> se déroule avant la combustion. Cette technique est une adaptation de la technologie de cycle combiné de gazéification intégrée (IGCC<sup>122</sup>). Cette technologie est beaucoup plus récente que la postcombustion, elle est aussi beaucoup plus complexe et délicate à mettre en œuvre. D'après

<sup>&</sup>lt;sup>120</sup>Philip J. Vergragt, Nils Markusson, Henrik Karlsson, 2011, *Carbon capture and storage, bio-energy with carbon capture and storage, and the escape from the fossil-fuel lock-in*, p. 282.

<sup>&</sup>lt;sup>121</sup>Noé Lecocq, 2013, Captage et stockage du carbone, solution ou mirage? p. 14.

<sup>&</sup>lt;sup>122</sup> Integrated Gasification Combined Cycle. Une centrale IGCC est un type de centrale électrique utilisant le charbon comme combustible. Ces centrales se caractérisent par une opération de gazéification, qui convertit la matière solide en un gaz de synthèse combustible qui alimente la centrale électrique.

Noé Lecocq, seulement cinq centrales IGCC au charbon ayant une taille commerciale sont en fonctionnement, mais aucune n'était encore couplée à la technologie CCS<sup>123</sup>.

Le dernier procédé est l'oxycombustion. L'objectif de ce procédé est de brûler le combustible fossile dans de l'oxygène pur. Cela permet d'obtenir des fumées avec une concentration en CO<sub>2</sub> de l'ordre de 95 à 98%. L'avantage est que la séparation du CO<sub>2</sub> des autres gaz a un coût moindre que pour les autres méthodes. Néanmoins, la production d'oxygène est coûteuse et peut consommer jusqu'à 15% de la production d'électricité de la centrale<sup>124</sup>. N.Lecocq rappelle que la technologie d'oxycombustion est encore en phase de développement. A ce jour, cette technologie est seulement expérimentale.

D'après l'Agence internationale de l'énergie, les meilleures opportunités pour une capture à grande échelle du CO<sub>2</sub> regroupent les 3 domaines suivants<sup>125</sup>:

- Production d'électricité, produite à base de charbon, de gaz, de pétrole ou de biomasse
- Procédés industriels comme la production de ciment, de fer, de pâte à papier ou de produits chimiques. Ces activités représentent à elles seules 23% des émissions globales de CO<sub>2</sub>.
- Production de carburant. Le CO<sub>2</sub> peut être capturé au sein des raffineries de pétrole, de la production de carburant de synthèse ou de gaz naturel.

L'opération de captage s'apparente comme un réel challenge auprès des professionnels car son coût, qui représente environ 70% du total du procédé CCS<sup>126</sup>, rend le captage attractif au niveau de la recherche. Certains pays en sont conscients et motivent les institutions de recherche pour améliorer l'efficacité de la phase de captage. Au Japon, ils travaillent sur une nouvelle membrane. Selon eux, cette membrane serait prometteuse, car efficiente énergétiquement parlant et simple à mettre en œuvre<sup>127</sup>. Les trois méthodes de captage sont actuellement l'objet de nombreuses études<sup>128</sup>.

 $^{125}$  IEA , 2008,  $CO_2$  capture and storage: A key carbon abatement option, p 61.

<sup>&</sup>lt;sup>123</sup> N.Lecocq, 2013, *op.cit.*, p15.

<sup>124</sup> Ibid.

Teruhiko Kai T et al., 2013, Molecular Gate Membrane: Poly(amidoamine) Dendrimer/polymer Hybrid Membrane Modules for  $CO_2$ .

<sup>127</sup> Ibid.

 $<sup>^{128}</sup>$  Kanniche et al., 2009, Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for  $CO_2$  capture.

#### 3.1.2 Transport

Le transport semble être l'étape la mieux maitrisée. Pour de grandes quantités, le transport par pipelines est économiquement préférable, notamment sur des distances moyennes<sup>129</sup>. Pour de plus petites quantités, ainsi que de plus grandes distances à parcourir, le bateau, la route, ou le rail, pourraient être une meilleure alternative que le transport par pipelines<sup>130</sup>. Mais avant d'être transporté, le CO<sub>2</sub> doit d'abord être placé en condition supercritique, c'est à dire qu'il doit être mis dans des conditions de température (> 31°C) et de pression (> 74 bar) suffisamment élevé pour pouvoir être transporté de manière rentable. Sous cette forme, le gaz possède l'avantage d'avoir une viscosité proche de celle d'un gaz et une densité proche de celle d'un liquide.

Le vaste réseau européen de gazoduc peut servir de support au développement de pipelines visant à transporter du CO<sub>2</sub> pour être enfoui sous terre. Mais là encore, les challenges sont nombreux. Si le déploiement du CCS à une échelle suffisamment grande est mis en place, il faudrait construire de nouveaux réseaux d'oléoducs, partant de chaque point de captage, jusqu'aux sites sélectionnés pour stocker le CO<sub>2</sub>. Le CO<sub>2</sub> étant un gaz corrosif, l'entretien de ce vaste réseau devra aussi être pris en charge<sup>131</sup>.

#### 3.1.3 Stockage

Le stockage est la phase de procédé CCS qui soulève le plus de questions ou problèmes. En effet, deux possibilités sont proposées pour enfouir le CO<sub>2</sub> pendant plusieurs centaines voire milliers d'années.

D'une part, il y a les aquifères salins, qui sont des formations géologiques naturelles, créés au fil des millénaires, au gré des mouvements des plaques tectoniques. D'autre part, il y a les sites d'exploitation pétrolier ou gazier vide.

Le principal défi qui se pose aux ingénieurs est de savoir si le site sélectionné est hermétique ou non. Et s'il s'avère hermétique sur une période de 10 ans, le sera-t-il également sur une période de 300 ans?

En Europe, les groupes Ove Arup et Partners Limited (Arup) et leurs partenaires écossais (SCCS<sup>132</sup>) ont été mandaté en décembre 2009 par la Commission européenne pour évaluer les

<sup>&</sup>lt;sup>129</sup> N.Lecocq, 2013, *op.cit.*, p. 16.

<sup>130</sup> Ibid.

<sup>131</sup> Ihid

<sup>&</sup>lt;sup>132</sup> Scottish Carbon Capture and Storage.

lieux et les potentiels de stockage du CO<sub>2</sub> sur le territoire européen<sup>133</sup>. Les aquifères salins et les sites pétroliers et gaziers épuisés ont été identifiés comme ayant de grandes capacités de stockage. Sur base d'hypothèses qui ne sont pas détaillées dans ce document, ils proposent deux cartes de l'Europe. Une est basée sur des estimations optimistes, l'autre sur des estimations plus conservatrices. La figure 13 représente la localisation des sites et leurs potentiels de stockage, suivant le scénario « conservateur ».

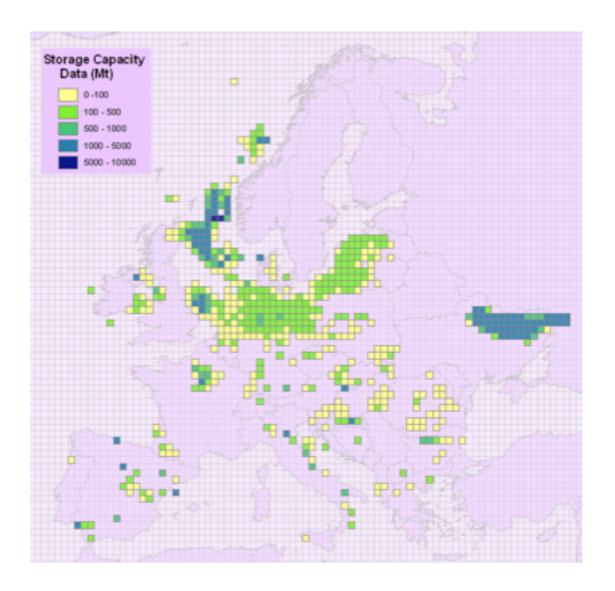


Figure 13: Localisation de potentiels sites de stockage de  $CO_2$  en Europe. Source: European Commission Directorate-General Energy, 2010, Feasibility Study for Europe-Wide  $CO_2$  Infrastructures.

<sup>&</sup>lt;sup>133</sup> European Commision Directorate-General Energy, 2010, *Feasibility Study for Europe-Wide CO2 Infrastructures*.

Premièrement, on constate que les sites ayant la plus grosse capacité de stockage se trouvent sous la mer du Nord et dans le Nord-Est de l'Ukraine. Les deux seuls sites identifiés avec des capacités comprises entre 5000 et 10 000 Mt (5 à 10 PgC) se trouvent sous la mer du Nord.

Deuxièmement, on remarque qu'il existe un grand nombre de sites plus petits, ayant une capacité comprise entre 500 et 1000 Mt (0,5 à 1 PgC), principalement situés dans une zone allant des Pays-Bas au Nord de l'Allemagne et jusqu'en Pologne.

### 3.1.4 Technologies en place

En 2014, il existe encore très peu d'installations à travers le monde. Le tableau 3 est extrait de l'étude réalisée par Inter Wallonie Environnement (IEW) sur la capture et le stockage de CO<sub>2</sub><sup>134</sup>. Pour réaliser ce tableau, IEW s'est appuyé sur les projets identifiés par la Commission européenne (CE, 2013).

<sup>&</sup>lt;sup>134</sup> N.Lecocq, 2013, op.cit.

Nom	Pays	Expoitant principal	Source de CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> capté (Mt/an)	Type de stockage	Motivation économique	Statut	Mise en service
Shute Creek	USA	Exxon- Mobil	Traitement du gaz naturel	7	EOR	récupération de pétrole	en cours	1986
Century Plant	USA	Occiden- tal Petroleum	Traitement du gaz naturel	5	EOR	récupération de pétrole	en cours	2010
Great Plains & Weyburn	USA, Canada	Cenovus Energy	Gazéifi- cation du charbon	3	EOR	récupération de pétrole	en cours	2000
Val Verde	USA	Acteurs multiples	Traitement du gaz naturel	1,3	EOR	récupération de pétrole	en cours	1972
Sleipner	Norvège	Statoil	Traitement du gaz naturel	1	SA	Taxe CO <sub>2</sub> norvégienne	en cours	1996
In Salah	Algérie	BP	Traitement du gaz naturel	1	DGF	MDP	injection suspendue en 2011 suite à des problèmes d'étanchéité de sismicité induite	2004
Snøhvit	Norvège	Statoil	Traitement du gaz naturel	0,7	SA	Taxe CO <sub>2</sub> norvégienne	en cours	2008
Enid	USA	Koch Nitrogen	Production d'engrais	0,68	EOR	récupération de pétrole	en cours	2003

Tableau 3: Liste des projets CCS en cours. Source: N.Lecocq, Capture et séquestration de carbone, 2013, p9.

Comme l'indique le tableau 3, les seuls pays qui ont actuellement des installations CCS en état de fonctionnement sont les Etats-Unis, le Canada, la Norvège et l'Algérie. On constate 3 types de stockage:

- Récupération assistée des hydrocarbures (EOR<sup>135</sup>) motivé par une récupération supplémentaire de pétrole.
- Aquifères salins (SA<sup>136</sup>) motivé par une taxe.
- DGF motivé par le Mécanisme de Développement Propre du Protocole de Kyoto (MDP).

\_

<sup>&</sup>lt;sup>135</sup> Enhanced Oil Recovery.

<sup>136</sup> Salin Aquifere.

Sur les huit sites, cinq sont mis en place pour ce qu'on appelle la récupération assistée des hydrocarbures (EOR). Ces centrales sont souvent présentées comme plus propre d'un point de vue environnemental. Seulement, la principale motivation des compagnies pétrolières qui utilisent cette méthode est d'augmenter la quantité d'hydrocarbure pouvant être extrait d'un puits de pétrole. Le CO<sub>2</sub>, provenant dans la plupart des cas de sources naturelles<sup>137</sup>, est injecté avec une forte pression dans la poche de pétrole. Ainsi, l'entreprise qui exploite le site peut obtenir entre 10 et 30% d'hydrocarbures supplémentaires<sup>138</sup>. L'objectif, pour les compagnies pétrolières, est de compenser le coût de l'installation qui permet de stocker le CO<sub>2</sub>. En 2008, on estimait que la vente de CO<sub>2</sub> destiné à être utilisé par la méthode EOR s'élevait à 56 millions de tonnes, dont environ 85% était issu de sources naturelles<sup>139</sup>.

Parmi les sites EOR dans le monde, un seul utilise du CO<sub>2</sub> issu de fumées industrielles. Il s'agit de Weyburn au Canada. Seulement, il est difficile de prouver que le bilan carbone est favorable d'un point de vue environnemental. Le site de Weyburn, grâce à la technique EOR, est susceptible de fournir 155 millions de barils supplémentaires, ce qui correspond à une émission de 71 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> supplémentaires dans l'atmosphère<sup>140</sup>. Le site ayant, à terme, une capacité de stockage de 78 millions de tonnes, le bilan net est le suivant: 7 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> se trouveront sous terre et non dans l'atmosphère<sup>141</sup>. Mais ce bilan ne prend pas en compte les points suivants:

- Energie nécessaire pour séparer le CO<sub>2</sub> des autres gaz lors de la phase de captage.
- Transport entre la centrale à charbon et le site de Weyburn.
- Energie nécessaire pour injecter le CO<sub>2</sub> supercritique dans la poche de pétrole.

Au final, le bilan net de cette opération est peut être négatif en terme environnemental. N.Lecocq va même plus loin en évoquant un chiffre proposé par Greenpeace: « Sur le site Weyburn, chaque kilogramme de CO<sub>2</sub> injecté provoque l'émission d'environ 3,02 kg de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère! » 142

Mais, de la part de la compagnie pétrolière, on pourrait supposer que si elle n'utilisait pas du CO<sub>2</sub> issu de la combustion de charbon, elle fonctionnerait de la même manière que les autres

<sup>139</sup> Ibid., p. 40.

<sup>&</sup>lt;sup>137</sup> ADEME, 2010, *Panorama des voies de valorisation du CO*<sub>2</sub>, rapport réalisé par Alcimed pour le compte de l'Agence de l'Environnement et de la maitrise de l'énergie.

<sup>138</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>140</sup> Ibid., p. 43.

<sup>&</sup>lt;sup>141</sup> Ibid., p. 43.

<sup>&</sup>lt;sup>142</sup> N.Lecocq, 2013, *op.cit.*, p. 29.

installations EOR dans le monde: CO<sub>2</sub> d'origine naturelle, afin augmenter le rendement de l'exploitation.

Les sites norvégiens seront traités plus en détail au chapitre 3.5. Car, d'une part, ils se trouvent en Europe. D'autre part, le site de Sleiper a été mis en place il y a presque 20 ans. De plus, les sociétés concernées sont motivées par une taxe écologique sur le CO<sub>2</sub>.

# 3.2 Approche économique

Comme expliqué au chapitre 3.1.1, le coût principal concerne le captage du CO<sub>2</sub>, du fait de l'opération de séparation du CO<sub>2</sub> avec les autres gaz. Les industriels le savent bien et anticipent un probable développement du CCS en misant sur la recherche car, à l'heure actuelle, le coût de la production d'électricité avec CCS reste élevé.

### 3.2.1 Coût de la production d'électricité avec capture de carbone

Le coût va d'abord dépendre du type d'installation. Mais le coût propre de l'installation CCS a un impact sur la quantité d'énergie produite par la centrale avec ou sans CCS.

Les coûts supplémentaires liés à l'utilisation de la technologie CCS sont non négligeables. Ils sont principalement composés des trois éléments suivants<sup>143</sup>:

- Perte de puissance électrique: la capacité de production brute devra augmenter pour la même puissance en sortie.
- Coûts des équipements additionnels de capture.
- Coût de l'énergie utilisée pour effectuer cette opération de capture.

La figure 14 indique les différents coûts de l'énergie pour des centrales à charbon, suivant qu'elles sont équipées de la technologie CCS ou non.

\_\_\_

<sup>&</sup>lt;sup>143</sup> IEA, 2008, *op. cit.*, p. 61.

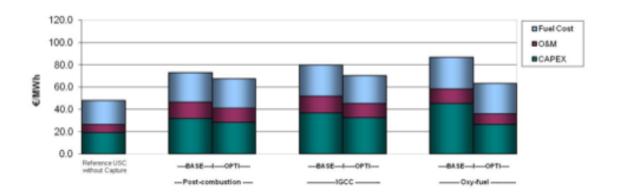


Figure 14: Estimation du coût pour centrale à charbon avec capture de CO<sub>2</sub>. Source: ZEP, 2011, The Costs of CO<sub>2</sub> Capture, p6.

Les estimations données dans la figure 14 sont basées sur le coût des équipements et d'énergie en valeur monétaire de 2009. La référence est une centrale à charbon sans technologie de capture de CO₂. Il a été calculé que le coût, lié à l'application de la technologie CCS, passerait d'environ 45€/MWh à 70€/MWh<sup>144</sup>. Même dans le cas du processus d'oxycombustion pour une centrale à charbon optimisé (OPTIM), le moins cher parmi tous, le coût par MWh serait toujours supérieur d'au moins 15 euros par rapport à une centrale classique sans technologie de captage. De plus, ces calculs ne prennent pas en compte le coût du transport ni du stockage.

Sur la figure 15 apparaît le coût associé à chaque tonne de CO<sub>2</sub> capturée pour des centrales à charbon avec CCS. Le meilleur résultat correspondrait à la technologie de postcombustion pour une centrale à charbon optimisée. Le prix de la tonne de CO<sub>2</sub> capturé serait de 28,5 euros. Par contre, le prix serait de presque 60 euros pour une centrale utilisant l'oxycombustion.

 $<sup>^{144}</sup>$  European Technology Patform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants, 2011, The Costs of CO $_2$  Capture.

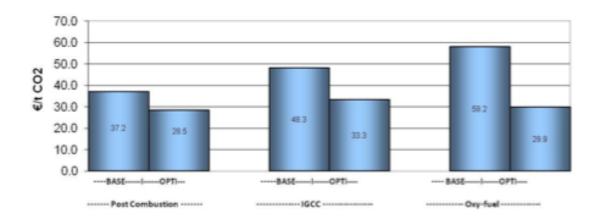


Figure 15: Coût par tonne de CO<sub>2</sub> capté pour des centrales à charbon avec CCS. Source : ZEP, 2011, The Costs of CO<sub>2</sub> Capture, p6.

Outre ces coûts supplémentaires, un développement économiquement rentable du CCS en Europe dépendra en grande partie du marché du carbone, dont le nom officiel est EU ETS (European Union Emission Trading scheme). Qu'est-ce que le marché du carbone? Pourquoi le CCS est intiment lié à ce marché? Quelles sont les dérives éventuelles?

#### 3.2.2 Le système d'échange des émissions de l'Union européenne (EU ETS)

La directive européenne 2003/87/CE a été crée en octobre 2003 afin d'établir un système d'échange de GES au sein de l'Union européenne devant permettre de respecter les objectifs de réduction fixé par le protocole de Kyoto.

Pour mieux comprendre l'origine de cette directive sur laquelle repose l'avenir du CCS, Frédéric Denhez, dans son livre *La dictature du carbone*, propose de revenir sur l'origine de ce marché.

Dans les années 1960, l'économiste écossais Ronald Coase a apporté une modification à la théorie de l'économique néoclassique. Lors de la parution de l'article « The Problem of Social Cost », il dit que « ce n'est pas à l'Etat de corriger la distorsion entre pollueurs et pollués, mais aux acteurs eux-mêmes ».

Ronald Coase se positionne en opposition à Arthur Pigou<sup>145</sup>, qui lui, estimait que l'Etat avait un rôle fondamental dans la régulation des marchés. R.Coase justifiait sa théorie par une raison simple: «L'intervention des pouvoirs publics est toujours lourde, lente, compliquée et donc

<sup>&</sup>lt;sup>145</sup> Avant Ronald Coase, la théorie néoclassique était déjà inconsciente des rôles limitatifs du facteur « terre ». Arthur Pigou défendait lui aussi la théorie de l'économie néoclassique.

coûteuse. Or, dans la théorie économique dite néoclassique, une négociation doit toujours avoir le coût le plus faible possible»<sup>146</sup>.

Selon R.Coase, les pollueurs et les pollués sont tout à fait capables de déterminer entre eux le montant de la pollution acceptable par tous. Par opposition, A.Pigou défend l'idée que l'Etat doit intervenir au travers de taxes pour réguler le marché (taxe pigouvienne).

Selon le principe pollueur-payeur revu par R.Coase, « le marché définit un niveau de pollution optimal afin que les prix n'augmentent pas trop pour se conformer, éventuellement, à une norme. Dépolluer au-dessus de ce seuil optimal coûterait beaucoup d'argent et risquerait de ruiner les pollueurs, alors que dépolluer juste ce qu'il faut pour que l'optimum soit maintenu entretient l'activité et ne lèse pas le pouvoir d'achat » 147.

Beaucoup d'économistes estiment que la solution la plus efficace pour limiter les émissions au sein de l'UE est bien le marché et pas la taxe: préférence à la théorie coassienne plutôt que pigouvienne.

Frédéric Denhez conclut en essayant de donner une explication simplifiée: « Le marché, c'est le hasard des prix pour atteindre une quantité précise ; la taxe, c'est l'inconnue de la quantité obtenue à partir d'un tarif prédéfini » <sup>148</sup>.

Le marché d'échange EU ETS est basé sur la théorie coassienne, dans l'idée que les biens communs peuvent être traduits financièrement : tout peut se décider entre vendeurs et acheteurs au sein d'un marché.

Le principe du marché EU ETS consiste à « définir une masse globale maximale de dioxyde de carbone, la diviser en tranches (quotas), les répartir entre les émetteurs, définir un prix de la tranche qui permette d'alléger l'atmosphère » <sup>149</sup>. Il faut donc définir le prix de chaque tranche (1 tonne de CO<sub>2</sub>).

Selon la théorie coassienne, le prix doit se déterminer de lui-même sur le marché du fait des échanges entre les pollueurs et les pollués, qui atteindraient le prix optimal, comme pour tout bien de consommation classique. Sauf que la situation n'est pas la situation de pollueurs/pollués mais plutôt de pollueurs qui polluent beaucoup/pollueurs qui polluent moins. Il faut donc que ce

<sup>148</sup> Ibid., p. 223.

52

<sup>&</sup>lt;sup>146</sup> Frédéric Denhez, 2011, *La dictature du carbone*, pp. 221-245.

<sup>&</sup>lt;sup>147</sup> Ibid., p. 223.

<sup>&</sup>lt;sup>149</sup> Ibid., p. 226.

prix soit fixé par l'Etat. Mais le modèle qui servit de base au marché européen, celui qui permit de «tant faire diminuer la concentration de dioxyde de soufre dans les villes américaines, était en vérité un monstre administratif, lourd et coûteux, né de la nécessité de vérifier, de contrôler, de punir et de favoriser un marché qui, spontanément, n'aurait pas fonctionné »<sup>150</sup>.

Les institutions européennes ont donc décidé de laisser faire le marché pour la définition du juste prix de la tonne de carbone. Aujourd'hui, ce marché connaît quelques difficultés.

La première concerne le fait les quotas ont été alloués gratuitement et en grande quantité lors de la première phase prévue par le protocole de Kyoto, sur la période 2003-2005. Un nombre important de quotas sur le marché, lié à des réductions demandées, finalement peu restrictives, ont fait brusquement chuter le prix de la tonne de carbone, passant de 23 euros à 0 en deux ans<sup>151</sup>.

Lors de la deuxième phase, sur la période 2008-2012, la valeur de la tonne a oscillé entre 13 et 25 euros<sup>152</sup>. Aujourd'hui, depuis le lancement de la troisième phase, malgré une réduction du nombre de quotas disponibles sur le marché (masse globale maximale de CO<sub>2</sub>) et la mise en place d'un système d'enchère pour acquérir chaque part ou quotas, le prix de la tonne est à 6 euros. D'après la vision de la taxe pigouvienne, l'estimation de la tonne de carbone est d'environ 100 euros<sup>153</sup>, soit plus de quinze fois le prix actuel.

Ce mécanisme rend la technologie CCS attractive pour les pays qui exploitent des ressources fossiles, notamment le gaz. La Norvège et la Russie sont par exemple très concernées par la technologie CCS. Ces deux pays produisent du gaz en grande quantité, mais également du pétrole. En couplant des technologies comme le CCS à leurs unités de production de gaz, ils peuvent, d'une part, continuer à exploiter leurs ressources, d'autre part, revendre sous forme de crédit carbone le CO<sub>2</sub> économisé, ou plutôt stocké dans le sous-sol.

La technologie CCS est donc liée au bon fonctionnement de ce marché du carbone. Un prix élevé de la tonne de CO<sub>2</sub> est un impératif pour que cette technologie se développe. En effet, le prix de 6 euros de la tonne de CO<sub>2</sub>, n'est pas assez élevé comparé au coût de 28,5 euros par tonne de CO<sub>2</sub> capturé (voir figure 15).

152 Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>150</sup> Ibid.,p227.

<sup>151</sup> lbid.

<sup>&</sup>lt;sup>153</sup> Ibid., p235.

## 3.3 Risques écologiques

Le principal risque concernant le CCS concerne la fiabilité du stockage géologique à long terme. En 1986, une catastrophe a eu lieu suite à une fuite d'une source naturelle de CO<sub>2</sub> située sous le lac Nyos au Cameroun. 240 000 tonnes de CO<sub>2</sub> ont été libérées subitement depuis les profondeurs du lac<sup>154</sup>. Le CO<sub>2</sub> étant plus lourd que l'air, si une grande quantité était relâchée au même endroit dans l'atmosphère, le CO<sub>2</sub> resterait concentré à la surface si les conditions météorologiques y étaient favorables. Un fort vent pourrait disperser le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère rapidement. Mais lors de cette fuite, les conditions pour que le CO<sub>2</sub> s'accumule à la surface étaient réunies, 1700 personnes et une dizaine de milliers d'animaux ont trouvé la mort, car à forte concentration le CO<sub>2</sub> est un gaz inodore, incolore et fortement toxique. Si le CCS devait se développer fortement dans les années à venir comme étant la principale technologie de lutte contre les émissions de GES, la probabilité de zones à risques (avec une potentielle forte concentration de CO<sub>2</sub> si fuite) augmenterait également. C'est là tout l'enjeu de sécuriser le stockage, en se basant sur des expériences déjà menées, comme en Norvège dans la mer du Nord, ou ailleurs dans le monde. La « peur de la fuite » est une des raisons qui a freiné les projets pilotes menés en Europe, comme détaillé au chapitre 3.4.

## 3.4 Résistances sociales et économiques

La technologie CCS serait, selon les quelques études réalisées, très peu connue du grand public<sup>155</sup>. Dans les régions où les institutions et les grands groupes énergétiques ont tenté de l'implanter, elle s'est opposée à une résistance de la part des citoyens. En Europe, la Commission européenne avait lancé en 2009 le plan « recovery package » qui visait à financer 6 projets démonstrateurs dans 6 pays européens: l'Angleterre, l'Allemagne, la Pologne, les Pays-Bas, l'Italie et l'Espagne. Sur ces 6 projets, le projet allemand a été arrêté car il a rencontré de la part du public une peur des fuites éventuelles<sup>156</sup>. En Pologne par contre, le public ne semblait pas y porter grand intérêt mais ce sont les politiques qui ont refusé le projet, estimant le coût trop élevé<sup>157</sup>. En Espagne et en Italie, c'est la crise financière et la complexité technique des projets qui aurait « tué dans l'œuf » le développement de ces projets.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>154</sup> N.Lecocq, 2013, op. cit., p. 33.

<sup>&</sup>lt;sup>155</sup> Klaas Van Alphen, 2007, Societal acceptance of carbon capture and storage technologies.

<sup>&</sup>lt;sup>156</sup> Bjørn Stålen Kaavik, comm. pers., conseiller pour l'énergie au sein du ministère norvégien du climat et de l'environnement. Entretien d'une heure le 24 juillet 2014.

157 Ihid.

Parmi les 6 projets initialement prévus, seul le projet hollandais pourrait aboutir. Le fait que le stockage soit situé offshore et non dans les terres, a favorisé son acceptation de la part du public. La Commission européenne est très active sur ce sujet et insiste pour que ce projet aboutisse. Elle demande le soutien, notamment financier, de la part du gouvernement hollandais mais aussi de la part de l'UE. Pour l'instant, les positions sont plutôt négatives, l'Angleterre et la Pologne refusent d'apporter leur soutien, quant à la France et l'Allemagne, ils n'ont pas encore pris leur décision. Seul la Norvège est prête à soutenir un tel projet, surtout sur la partie technologique. Si le projet aboutit, le CO<sub>2</sub> serait stocké à environ 30 Km de Rotterdam et transporté par pipeline 158.

158 Ibid.

## 3.5 Retour d'expérience: Le cas norvégien

La Norvège est le premier exportateur de pétrole et de gaz en Europe, seulement une petite partie de leur production est utilisée sur place. En Norvège, plus de la moitié de la demande énergétique primaire est couverte par l'hydroélectricité, fournissant ainsi 99% de l'électricité générée sur place<sup>159</sup>. Cette situation fait que la Norvège est le seul pays européen qui s'est vu attribuée une autorisation d'augmenter ses émissions de GES de 1% sur la période 2008-2012, comparé aux émissions de 1990<sup>160</sup>.

Le premier projet norvégien en recherche et développement sur le thème du CCS a débuté en 1987, par l'institut de recherche SINTEF. En 1996, la Norvège a été le premier pays européen à mettre en place le système CCS intégré à la plateforme gazière de Sleiper. Depuis 1996, 1 Mt de CO<sub>2</sub> par an est séquestré dans la formation géologique d'Utsira, un aquifère salin situé 1000 mètres sous le plancher océanique<sup>161</sup>. C'est la proximité de la poche géologique et de la ressource de gaz qui ont permis le développement rapide de cette installation<sup>162</sup>. On peut considérer que ce site est le seul monde à stocker le CO<sub>2</sub> dans un but qui n'est pas seulement économique. Aujourd'hui, les infrastructures norvégiennes sont les plus performantes en terme de stockage de CO<sub>2</sub>.

La Norvège a donc une large expérience dans le domaine du stockage de CO<sub>2</sub> dans des formations géologiques. Le stockage à Sleiper ayant débuté il y a presque 20 ans, ce site est une des expériences les plus longues en terme de maitrise de stockage du CO<sub>2</sub> au niveau mondial.

L'autre grand stockage de CO<sub>2</sub> offshore est le site de Snøvit, dans la mer du Nord. Mis en service en 2008, il peut être stocké jusqu'à 700 000 tonnes de CO<sub>2</sub> supercritique chaque année. Ces deux sites stockent au total presque 2 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année.

Mais les norvégiens possèdent un autre site, nommé Mongstad, qui est le plus grand projet CCS au monde, rassemblant une grande quantité d'études technologiques. Ils sont notamment spécialisés dans l'amélioration des techniques de captage, qui comme vu au chapitre 3.1.1, représente environ 70% du coût total du CCS.

<sup>&</sup>lt;sup>159</sup> Klaas Van Alphen et al., 2009 (b), *The performance of the Norwegian carbon dioxyde, capture and storage innovation system*, pp. 43-55.

<sup>160</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>161</sup> Norwegian Ministry of Petroleum an Energy, Norwegian Storage Experience, récupéré sur <u>www.co2store.org</u>., le 15 juillet 2014.

<sup>&</sup>lt;sup>162</sup> Klaas Van Alphen, Marko P Hekkert, Wim C. Turkenburg, 2009 (a), *Accelerating the deployment of carbon capture and storage technologies by strengthening the innovation system*, pp. 396-409.

Un investissement important avait été prévu pour que soit développée une capture du CO<sub>2</sub> à grande échelle à Mongstad. La compagnie pétrolière Statoil était responsable de la gestion de projet, alors que l'Etat norvégien garantissait le financement. Mais le projet a été arrêté, car le coût s'est révélé beaucoup trop élevé à cause d'une mauvaise estimation de la complexité d'implémentation de la technologie sur ce site. L'état norvégien aurait débourser 927 millions d'euros, entre 2007 et 2012, pour le projet CCS de Mongstad (et Kårstø)<sup>163</sup>. En Norvège, ce sujet est assez sensible car l'argent investi provient de l'Etat, donc des citoyens norvégiens. Un grand nombre d'entre eux sont très critiques envers leurs politiques quant à l'échec de ce projet vis-àvis du montant investi<sup>164</sup>. Pour l'instant, le site est en quelque sorte un grand laboratoire de recherche pour l'amélioration de l'efficience énergétique de la technologie CCS<sup>165</sup>.

D'autres projets sont à l'étude, comme la centrale à charbon de Svalbar, où l'on étudie la possibilité de l'installation du CCS.

La Norvège fait figure d'exemple dans le développement de ces nouvelles technologies et doit servir de référence pour les projets européens à venir, si tant est qu'ils aboutissent.

## 3.6 Energies fossiles dans le monde

Le secteur de l'énergie est responsable des deux tiers des émissions mondiales de GES. Cette forte contribution du secteur de l'énergie fait que ce secteur est une cible privilégiée pour atténuer le changement climatique. Dans le monde, la Chine est en passe de devenir le plus grand importateur mondial de pétrole et l'Inde deviendra le premier importateur mondial de charbon à partir de 2020. « Le centre de gravité de la demande énergétique se déplace résolument vers les économies émergentes, en particulier vers la Chine, l'Inde et le Moyen-Orient, qui sont responsables de l'augmentation d'un tiers de la consommation mondiale d'énergie d'ici à 2035 » <sup>166</sup>. De leur côté, les Etats-Unis, grâce notamment à l'exploration de nouveaux gisements non conventionnels comme le pétrole ou le gaz de schistes, devraient atteindre l'autosuffisance énergétique d'ici à 2035. Tous ces éléments auront pour conséquence une « réorientation du commerce énergétique, du bassin atlantique vers la région Asie-Pacifique » <sup>167</sup>. Enfin, près de la moitié des 1,3 milliards de personnes qui sont privées d'électricité dans le monde se trouvent en

<sup>&</sup>lt;sup>163</sup> N.d., 23 septembre 2013, Norway drops 'high-risk' Mongstad, ENDS Europe.

<sup>&</sup>lt;sup>164</sup> Op.cit., comm. pers., 28 juillet 2014.

<sup>165</sup> Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>166</sup> IEA, 2013, World Energy Outlook, 2013, Résumé, French Translation, p. 1.

<sup>167</sup> Ibid.

Afrique. L'AIE rappelle que: « Globalement, les combustibles fossiles conservent une position dominante dans la satisfaction de la demande énergétique mondiale, ce qui a des répercussions sur les liens en énergie, environnement, et changement climatique » <sup>168</sup>.

A ce jour, l'énergie représente toujours une faible part dans les calculs de compétitivité de la plupart des pays du monde. Dans l'édition spéciale du WEO (World Energy Outlook), *Redéfinir les contours du débat énergie-climat*, publié en juin 2013, il est proposé les quatre mesures suivantes <sup>169</sup>:

- Stimulation de l'efficacité énergétique.
- Limitation de la construction et de l'utilisation de centrales à charbon les moins efficaces.
- Réduction des émissions de méthanes dans le secteur gazier et pétrolier en amont.
- Réforme de subventions aux combustibles fossiles.

Concernant le dernier point, en 2012, 544 milliards de dollars de subventions ont été attribués aux énergies fossiles. Les subventions allouées aux énergies renouvelables s'élevaient à 100 milliards de dollars. L'objectif est d'augmenter ce montant pour atteindre 220 milliards en 2035<sup>170</sup>.

# 3.7 Conditions de succès pour le futur

Le développement de la technologie CCS dépend de nombreux paramètres. Parmi eux, le critère économique, basé sur un prix élevé de la tonne de carbone, semble actuellement être le frein majeur. Le prix de la tonne, estimé suffisant, pour un développement économique rentable de la technologie, se situe aux alentours de 60-70 dollars par tonne. Or aujourd'hui, le prix de la tonne sur les marchés, d'environ 6 euros, est trop faible.

Mais la Commission européenne est motivée, à travers certains lobbies, pour développer le financement de nouvelles centrales électriques couplées à la technologie CCS. L'Angleterre vient tout juste de recevoir une aide financière substantielle (300 millions d'euros) pour la création d'une centrale IGCC.

La Commission européenne a récemment mis en place le programme NER300 (New Entrants Reserve). NER300 est actuellement le plus grand programme de financement dédié à la

169 Ibid.

<sup>&</sup>lt;sup>168</sup> Ihid

<sup>170</sup> Ibid.

technologie CCS. Ce programme est financé à travers la vente de 300 millions de quotas au sein du système EU ETS. Il doit permettre de financer les futurs projets CCS.

Très récemment, en Angleterre, le projet Drax's White Rose a été le premier projet à recevoir l'aide financière de la part du programme NER300. Ainsi, 300 millions d'euros viennent d'être alloués pour développer une nouvelle centrale IGCC dans le Yorkshire<sup>171</sup>. Le CO<sub>2</sub> devrait être stocké dans la mer du Nord. A terme, le site devrait capturer 1,8 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an. Si ce projet aboutit, il deviendrait le plus grand site de stockage européen.

Graeme Sweeney, président du groupe de lobby ZEP (Zero Emission Platform), dit au sujet du financement de la centrale IGCC en Angleterre: « La Commission européenne envoie un signal fort, réaffirmant l'importance du déploiement du CCS mais également que nous devons continuer à pousser les projets européens au niveau de l'UE mais aussi au niveau des états membres »

L'UE semblent donc vouloir accélérer le développement du CCS en Europe. Mais l'expérience du site Mongstad en Norvège est là pour rappeler que chaque phase du projet doit être bien identifiée, pour ne pas financer des projets qui pourraient être arrêtés dans le futur. D'autres sites norvégiens fonctionnent néanmoins, grâce à une taxe sur la tonne de carbone, qui n'existe pas au sein de l'UE. Le marché du carbone, tel qu'il fonctionne aujourd'hui, ne permet pas de développer cette activité de manière rentable. Les clés du succès sont donc d'associer un prix de la tonne de carbone suffisamment élevé à une volonté politique forte de mettre en place la technologie.

En ce qui concerne le stockage offshore, il ne semble pas y avoir d'opposition de la part du public. Mais, en admettant que la capacité maximale de stockage offshore soit atteinte, il serait probablement plus difficile de faire accepter le stockage dans les terres.

Pour viser une réduction efficace des émissions de GES issues de la combustion d'énergie fossile par le biais de l'utilisation de la technologie CCS, il faudrait que de nombreuses centrales à charbon chinoises soit équipées. La Chine devenant progressivement le gros consommateur d'énergie au monde (voir chapitre 3.6), elle représente le plus grand potentiel pour l'application de cette technologie en termes d'atténuation du changement climatique.

-

<sup>171</sup> François Le Goff, 8 juillet 2014, *UK project gets €300m EU funding boost*, ENDS Europe.

## 4 Piste d'amélioration: Valorisation du CO<sub>2</sub> industriel.

A l'heure actuelle, le CO<sub>2</sub> est déjà utilisé par l'industrie chimique, soit en tant que tel, sans transformation, dans les applications industrielles (gazéifiant des boissons, fluides réfrigérants, solvants, etc.), ou encore dans la récupération assistée des hydrocarbures (EOR), alors pourquoi ne pas utiliser du CO<sub>2</sub> issu de la mise en place de technique CCS ?

Le potentiel de valorisation est très important car: « Aujourd'hui, au niveau mondial, les utilisations industrielles (hors EOR) représentent un volume de 20 Mt, soit environ 0,06 % du total des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> par an »<sup>172</sup>.

Si l'on considère la totalité du volume de CO<sub>2</sub> utilisé aujourd'hui pour des applications industrielles, cela représente 153,5 Mt, dont environ 40Mt pour l'EOR. Cela représente environ 0,5% des émissions anthropiques mondiales annuelles<sup>173</sup>.

L'enjeu est donc bel et bien de trouver de nouvelles applications pour le CO<sub>2</sub>, qui pourraient être appliquées à grande échelle, en s'assurant de leur rentabilité économique et de leur impact positif sur l'environnement. Concernant le CO<sub>2</sub> non transformé, les applications ainsi que le marché semblent limités. Par contre, la valorisation par transformation chimique ou biologique est porteuse d'espoir.

Parmi les 20 Mt d'applications industrielles liées au marché du CO<sub>2</sub>, les boissons gazeuses et les réfrigérants sont celles qui représentent le plus gros tonnage. En ce qui concerne l'utilisation pour la filière de l'agro-alimentaire, le CO<sub>2</sub> doit être pur à 99,99 %. Par conséquence, il provient essentiellement de gisements de CO<sub>2</sub> naturels et d'usines de fabrication d'ammoniac. Mais, d'après l'ADEME, l'utilisation de CO<sub>2</sub>, capté lors de la production d'électricité, n'est pas impossible. Le CO<sub>2</sub> sous forme supercritique (> 31°C et >71 bar) a également des propriétés intéressantes. C'est un solvant qui peut servir à de nombreuses applications:

- EOR (récupération assistée des hydrocarbures).
- Séparation de liquides.
- Réactions chimiques.

-

<sup>&</sup>lt;sup>172</sup> ADEME, 2010, op. cit., p. 49.

<sup>&</sup>lt;sup>173</sup> François Moisan, n.d., *La valorisation du CO*<sub>2</sub>, dans: Rémi Moserry, Catherine Jeandel, 2013, L'énergie à découvert, p. 266-267.

- Formulation de médicaments.
- Stérilisation et applications médicales.

L'ADEME précise que le CO<sub>2</sub> supercritique est utilisé depuis les années 1990 comme surfactant et cosolvant<sup>174</sup>. Mais, la plupart des applications sont des niches limitées à de faibles volumes. Concernant les niches comme les boissons gazeuses, le CO<sub>2</sub> est immédiatement restitué à l'atmosphère après utilisation du produit.

D'autres pistes sont à l'étude pour valoriser du CO<sub>2</sub> issu de fumée industrielle. Le processus de méthanisation, qui permet de fabriquer de l'énergie à base de déchets organiques, a besoin d'une atmosphère anaérobie.

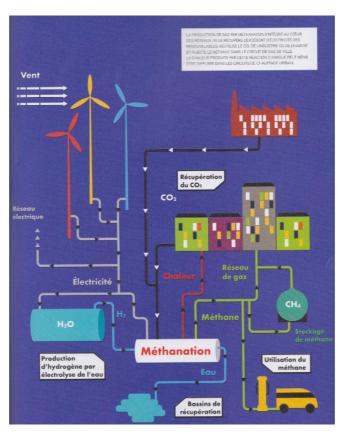


Figure 16: Schématisation simplifiée d'un procédé de méthanisation intégrant du  $CO_2$  récupéré de sources industrielles. Source: WE demain, revue parue à l'été 2014.

La figure 16 représente une schématisation simplifiée d'un système de méthanisation, ou le CO<sub>2</sub> est utilisé comme source d'énergie. Est-ce que cela fonctionne? Quel serait le bilan carbone de

-

<sup>&</sup>lt;sup>174</sup> ADEME, 2010, op. cit.

cette installation? C'est ce type de projets pour lesquels l'UE devraient accorder une grande partie de son soutien, notamment financier. Nous n'avons pas trouvé d'estimation quant au potentiel de la méthode décrite figure 16, mais cela représente une piste de valorisation pour le  $CO_2$  industriel.

La maxime célèbre d'Antoine Lavoisier « rien ne se crée, rien ne se perd, tout se transforme », pour définir la loi de conservation de la matière, devrait être une source d'inspiration pour les générations présentes et futures.

### **Conclusion**

Lors de l'analyse approfondie de la littérature existante, nous avons vu que les preuves du changement climatique sont nombreuses. Nous savons également que ce changement de climat est *très probablement* dû aux émissions de GES issues des sociétés humaines. Parmi les options envisageables pour atténuer ce phénomène non désirable, plusieurs solutions existent. Le changement des modes de vie occidentaux prendra du temps et les énergies renouvelables peinent à concurrencer les énergies fossiles, car les réserves en stock dans le sous-sol sont encore importantes. Certains cherchent donc à influencer directement les conséquences des émissions de GES, en réduisant le RF total de la Terre, ou en retirant les GES déjà accumulés dans l'atmosphère.

Parmi les solutions détaillées dans ce travail, la plupart des techniques soulèvent de nombreuses questions, relevant pour certaines de la complexité des technologies et pour d'autres, de freins économiques, sociaux, voire éthiques. Comme technique de géo-ingénierie, l'injection d'aérosols soufrés et la fertilisation par le fer semblent les moins raisonnables, tout comme l'éclaircissement des nuages marins ou encore les microbulles dans l'océan. Les panneaux filtrants au niveau du point de Lagrange paraissent irréalisables.

D'autres, comme le biochar, la capture directe dans l'air, la bio-énergie avec CCS, semblent de meilleur choix, mais les résultats sont longs à obtenir. Il reste des pistes comme l'accélération des roches silicatées. Si l'hypothèse évoquée par R.D Schuilling<sup>175</sup>, qui a calculé que 7 km<sup>3</sup> d'olivine seraient suffisant pour séquestrer la totalité des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, cela pourrait permettre d'atténuer rapidement le changement climatique, en reproduisant à grande échelle un processus existant dans la nature.

Mais à l'heure actuelle, aucun financement public n'est alloué à une de ces méthodes. Ce sont de riches entrepreneurs qui financent les recherches. Les subventions publiques mondiales vont d'abord aux énergies fossiles, et dans une deuxième mesure, aux énergies renouvelables. En Europe, l'objectif de l'UE est d'augmenter la part de financement des énergies renouvelables, mais également d'aider au développement de la capture et séquestration du carbone. La

\_

<sup>&</sup>lt;sup>175</sup> R.D Schuiling, n.d., *Weathering Approaches to Carbon Dioxide Sequestration*, pp. 141-167, dans: T.Lenton et N.Vaughan, 2013, op. cit.

technologie CCS, présentée comme une arme importante pour atténuer le changement climatique, est l'unique méthode à recevoir le soutien financier des institutions politiques européennes. Est-ce que cette technologie est un bon choix? Les avis divergent, effet « lock-in » des énergies fossiles ou développement « bas carbone », chaque camp a ses arguments.

Quoi qu'il arrive, le développement de la technologie augmenterait le nombre de sites où le CO<sub>2</sub> serait localisé, en grande quantité, sur un temps très long. Le développement durable, défini dans le rapport Brundtland, dit que « le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Le stockage de CO<sub>2</sub> dans le sous-sol possède la même dynamique que les déchets radioactifs. Ils seront là, les générations futures devront s'en occuper, sans avoir profité des avantages de l'énergie qui lui est associée. Heureusement, le CO<sub>2</sub> pourrait devenir une nouvelle source d'énergie dans le futur, en étant valorisé.

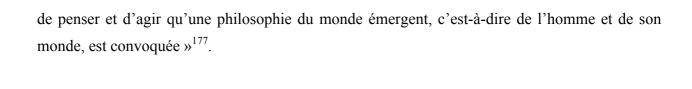
Quant à la géo-ingénierie, quelles vont être les conséquences de son évocation? Allons-nous assister à une prise de conscience des politiques, tellement les propositions rappellent l'urgence de la situation? Ou au contraire, allons-nous assister à ce que l'on nomme l'*aléa moral*<sup>176</sup>? Ce néologisme décrit ici le fait que la seule évocation d'un plan « B » pourrait freiner les objectifs de réduction de GES imposés par le protocole de Kyoto.

Nous avons les capacités de changer. Mais le voulons-nous vraiment? Certains, comme vous peut être, comme moi en tout cas, en sont convaincus. D'autres, probablement aveuglés par le pouvoir ou l'argent, ne le veulent pas forcément, ou ne se posent tout simplement pas la question. Deux forces s'affrontent, le résultat de l'opposition déterminera notre avenir à tous. Si le « business as usual » s'impose trop longtemps, nous serons obligés d'intervenir un jour de façon extrême. Si l'intelligence des hommes, par leur compréhension plus profonde du monde qui les entoure, prend le dessus, nous avons alors un espoir.

Se poser la question de savoir si la géo-ingénierie est une piste rationnelle pour atténuer le changement climatique va plus loin que la simple estimation physique ou économique. Nous avons vu quelques éléments concernant l'aspect social ou éthique, mais se poser ce genre de questions conduit naturellement à une interrogation plus profonde de la nature humaine. Souhaitons-nous réellement prendre totalement le contrôle de la nature? Est-ce bien là notre rôle? « C'est à cette profondeur de l'interrogation sur l'homme lui-même, sur ses modes d'être,

\_

<sup>&</sup>lt;sup>176</sup> Moral hazard en anglais.



177 Yves Charles Zarka, 2010, Le monde émergent, Les nouveaux défis environnementaux, p. 6.

### Bibliographie:

ADEME. Juin 2010. Panorama des voies de valorisation du CO<sub>2</sub>. Document final. Coordination technique: Nathalie THYBAUD, David LEBAIN.

Barrett, Scott. 2008. "The Incredible Economics of Geoengineering." *Environmental and Resource Economics* 39 (1): 45–54. doi:10.1007/s10640-007-9174-8.

Bertrand, Philippe. 2008. "Les attracteurs de Gaïa." Sciences. 304 p.

Boucher, O., D. Randall, P. Artaxo, C. Bretherton, G. Feingold, P. Forster, V.-M. Kerminen, Y. Kondo, H. Liao, U. Lohmann, P. Rasch, S.K. Satheesh, S. Sherwood, B. Stevens and X.Y. Zhang. 2013. Clouds and Aerosols. In: Climate Change, The Physical Science Basis. 2013. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao and P. Thornton. 2013. Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Caldeira, Ken, Govindasamy Bala, and Long Cao. 2013. "The Science of Geoengineering." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 41 (1): 231–256. doi:10.1146/annurev-earth-042711-105548.

Cao, Long, and Ken Caldeira. 2010 (a). "Atmospheric Carbon Dioxide Removal: Long-Term Consequences and Commitment." *Environmental Research Letters* 5 (2): 024011. doi:10.1088/1748-9326/5/2/024011.

Cao, Long, and Ken Caldeira. 2010 (b). "Can ocean iron fertilization mitigate ocean acidification?" *Climatic Change* (2010) 99:303-311. doi: 10.1007/s10584-010-9799-4

Crutzen, Paul J. 2006. "Albedo Enhancement by Stratospheric Sulfur Injections: A Contribution to Resolve a Policy Dilemma?" *Climatic Change* 77 (3-4): 211–219. doi:10.1007/s10584-006-9101-y.

Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther. 2013. "Introduction." In: "Climate Change, The Physical Science Basis". 2013. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Denhez Frédéric, 2011, "La dictature du carbone", Fayard, 300 p.

European Technology Patform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants. 2011. "The cost of CO<sub>2</sub> Capture." Post-demonstration CCS in the EU. Bruxelles.

Gómez, F., H. Claustre, P. Raimbault, and Sami Souissi. 2007. "Two High-Nutrient Low-Chlorophyll Phytoplankton Assemblages: The Tropical Central Pacific and the Offshore Perú-Chile Current." *Biogeosciences* 4 (6): 1101–1113.

Hamilton, Clive. 2013. Les apprentis sorciers du climat. Editions du Seuil. 338 p.

Hamwey, Robert M. 2007. "Active Amplification of the Terrestrial Albedo to Mitigate Climate Change: An Exploratory Study." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12 (4): 419–439.

International Energy Agency, 2013. "World Energy Outlook 2013". Résumé. French translation. Récupéré de <a href="https://www.worldenergyoutlook.org">www.worldenergyoutlook.org</a>.

International Energy Agency. 2008. "CO<sub>2</sub> capture and storage: A key carbon abatement option." Paris: International Energy Agency.

IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung,

A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Kai, Teruhiko, Ikuo Taniguchi, Shuhong Duan, Firoz Alam Chowdhury, Takashi Saito, Kota Yamazaki, Kenichi Ikeda, Tomomi Ohara, Shushi Asano, and Shingo Kazama. 2013. "Molecular Gate Membrane: Poly(amidoamine) Dendrimer/polymer Hybrid Membrane Modules for CO2 Capture." *Energy Procedia* 37: 961–68. doi:10.1016/j.egypro.2013.05.191.

Kanniche, Mohamed, René Gros-Bonnivard, Philippe Jaud, Jose Valle-Marcos, Jean-Marc Amann, and Chakib Bouallou. 2010. "Pre-Combustion, Post-Combustion and Oxy-Combustion in Thermal Power Plant for CO2 Capture." *Applied Thermal Engineering* 30 (1): 53–62. doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.05.005.

Lecocq, Noé. 2013. "Captage et Stockage du Carbone: solution u mirage?". Fédération Inter-Environnement Wallonie.

Le Goff François. 2014. "UK CCS project gets 300m € EU funding boost." ENDS Europe. Récupéré de <a href="https://www.endseurope.com">www.endseurope.com</a>.

Lenton, Tim M., and Nem E. Vaughan. 2009. "The Radiative Forcing Potential of Different Climate Geoengineering Options." *Atmospheric Chemistry and Physics* 9 (15): 5539–5561. Lenton, Tim, and Naomi Vaughan, eds. 2013. *Geoengineering Responses to Climate Change*. New York, NY: Springer New York. http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-5770-1.

MacCracken, Michael C. 2009. "On the Possible Use of Geoengineering to Moderate Specific Climate Change Impacts." *Environmental Research Letters* 4 (4): 045107. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045107.

Martin, John H.1990. "Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: the iron hypothesis", Paleoceanography 5 (1), pp. 1-13.

Moserry, Rémy, Jeandel, Catherine, 2013, L'énergie à découvert, 345 p.

OECD, 2011. "Environmental Outlook to 2050, Climate Change Chapter, Pre-release version."

Rhein, M., S.R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R.A. Feely, S. Gulev, G.C. Johnson, S.A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L.D. Talley and F. Wang, 2013: Observations: Ocean. In: Climate Change, The Physical Science Basis, 2013. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Ridgwell, Andy, Joy S. Singarayer, Alistair M. Hetherington, and Paul J. Valdes. 2009. "Tackling Regional Climate Change By Leaf Albedo Bio-Geoengineering." *Current Biology* 19 (2): 146–150. doi:10.1016/j.cub.2008.12.025.

Ross, Andrew, and H Damon Matthews. 2009. "Climate Engineering and the Risk of Rapid Climate Change." *Environmental Research Letters* 4 (4): 045103. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045103.

Royal Society (Great Britain). 2009. *Geoengineering the Climate Science, Governance and Uncertainty*. London: Royal Society.

Sarmiento, J. L., R. D. Slater, J. Dunne, A. Gnanadesikan, and M. R. Hiscock. 2010. "Efficiency of Small Scale Carbon Mitigation by Patch Iron Fertilization." *Biogeosciences* 7 (11): 3593–3624. doi:10.5194/bg-7-3593-2010.

Schellnhuber, Hans Joachim. 2011. "Geoengineering: The good, the MAD and the sensible." Telegraphenberg A31. 14412 Postam, Germany.

Seitz, Russell. 2011. "Bright Water: Hydrosols, Water Conservation and Climate Change." *Climatic Change* 105 (3-4): 365–81. doi:10.1007/s10584-010-9965-8.

Toggweiler, J. R., A. Gnanadesikan, S. Carson, R. Murnane, and J. L. Sarmiento. 2003. "Representation of the Carbon Cycle in Box Models and GCMs: 1. Solubility Pump: OCEAN SOLUBILITY PUMP." *Global Biogeochemical Cycles* 17 (1): n/a–n/a. doi:10.1029/2001GB001401.

Van Alphen, Klaas, Marko P. Hekkert, and Wim C. Turkenburg. 2009 (a). "Accelerating the deployment of carbon capture and storage technologies by strengthening the innovation system." International Journal of Greenhouse Gas Control 4 (2010) 396–409.

Van Alphen, Klaas, Jochem van Ruijven, Sjur Kasa, Marko Hekkert, and Wim Turkenburg. 2009 (b). "The Performance of the Norwegian Carbon Dioxide, Capture and Storage Innovation System." *Energy Policy* 37 (1): 43–55. doi:10.1016/j.enpol.2008.07.029.

Van Alphen, Klaas, Quirine van Voorst tot Voorst, Marko P. Hekkert, and Ruud E.H.M. Smits. 2007. "Societal Acceptance of Carbon Capture and Storage Technologies." *Energy Policy* 35 (8): 4368–80. doi:10.1016/j.enpol.2007.03.006.

Vaughan, Naomi E., and Timothy M. Lenton. 2011. "A Review of Climate Geoengineering Proposals." *Climatic Change* 109 (3-4): 745–790. doi:10.1007/s10584-011-0027-7.

Vergragt, Philip J., Nils Markusson, and Henrik Karlsson. 2011. "Carbon Capture and Storage, Bio-Energy with Carbon Capture and Storage, and the Escape from the Fossil-Fuel Lock-In." *Global Environmental Change* 21 (2): 282–292. doi:10.1016/j.gloenvcha.2011.01.020.

Zarka, Yves Charles. 2010. "Le monde émergent, Les nouveaux défis environnementaux." *Armand Colin.* 281 p.

N.d. 23 septembre 2013. "Norway drops 'high-risk' Mongstad." ENDS Europe. Récupéré de www.endseurope.com.

Sites internet:

http://www.endseurope.com, consulté pour la dernière fois le 9 août 2014.

www.worldenergyoutlook.org, consulté le 23 juillet.

http://www.statoil.com/en/TechnologyInnovation/NewEnergy/Co2CaptureStorage/Pages/Snohvit.aspx, consulté le 3 février.

http://www.economist.com, Geoengineering, Lift Off, consulté le 5 février 2014.

http://www.futura-sciences.com/magazines/espace/infos/dico/d/univers-point-lagrange-4540/, consulté le 20 avril 2014.

http://www.ecoconso.be, La géo-ingénierie: un plan B pour la planète?, L'art d'éco...Consommer n°102 – Dossier, consulté le 2 juillet 2014.

http://www.lefigaro.fr/international/2008/07/29/01003-20080729ARTFIG00003-ils-chassent-les-nuages-du-ciel-de-pekin-.php, consulté le 9 août 2014.

http://www.notre-planete.info/actualites/actu\_3727\_concentration\_CO2\_400\_ppm.php, consulté le 18 juillet 2014.

https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/, consulté le 18 juillet 2014.

<a href="http://unfccc.int/portal\_francophone/essential\_background/kyoto\_protocol/status\_of\_ratification/items/3346.php">http://unfccc.int/portal\_francophone/essential\_background/kyoto\_protocol/status\_of\_ratification/items/3346.php</a>, consulté le 24 juillet 2014.

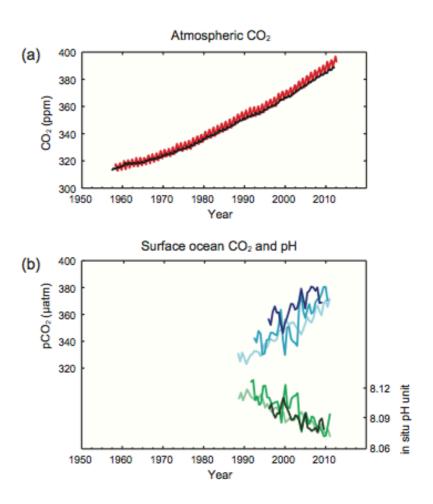
http://telescoop.tv/browse/535592/2/le-journal-de-13h.html, consulté le 9 août 2014.

www.ipcc.ch, consulté le 7 août.

www.co2store.org, consulté le 15 juillet 2014.

# **Annexes:**

Annexe 1: (a) Evolution de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique entre 1950 et 2014. (b) Evolution CO<sub>2</sub> et pH à la surface des océans. Source: IPCC AR5, 2013, *Summary for Policymakers*.



Annexe 2: Exemples de méthodes de CDR (Carbon Dioxyde Removal) et leurs implications sur le climat et le cycle du carbone. Source : IPCC AR5, 2013, *Carbon and Other Biogeochemical Cycles*.

Processus de cycle de carbone modifié volontairement	Nom de la méthode CDR	Nature de du processus deCDR	Lieu de stockage	Forme de stockage	Risques/implications sur le cycle du carbone et le climat
Améliorer la production biologique et le stockage dans le sol	Afforestation/refor estation  Améliorer la gestion forestière  Sequestration de bois dans les bâtiments  Enfouissement de biomasse	Biologique	Terres(biommas se, sols)	Organique Inorganique	Altération de l'albédo de surface et évapotranspiration  Manque de "permanence"  Potentiellement permament si enfoui dans le sous-sol de l'océan  Permanent si stocké dans des réservoirs geologiques
Améliorer la production biologique et le stockage dans l'océan	Fertilisation de fer dans l'océan  Agriculture d'algue Carbone bleu (Mangrove, agriculture de varech)  Modifier l'upwelling de l'océan pour apporter des susbtances nutritives depuis le fond de l'océan jusqu'à la surface	Biologique	Océans	Organique Inorganique	Pourrait conduire à augementer les régions avec une faible concentration d'oxygène, augmenter la production de NO2, l'acidification profonde des océans et perturbations d'écosystèmes et de cycles de carbones régionaux
Accélération de la météorisation	Améliorer la météorisation au dessus des terres	Chimique	Océans et sols	Inorganique	Retrait permanent; probabilité de changer le ph des sols, des rivières, des océans
Autres	météorisation au dessus des océans  Capture directe dans l'air avec stockage	Chimique	Océans Océans/formati ons géologiques	Inorganique	Retrait permanent et stocké dans des réservoirs géologiques

Annexe 3: Composition de la croûte terrestre.

# Minéraux Silicatés Majeurs de la Terre Il existe 6 minéraux silicatés majeurs dans la Terre. Minéraux silicatés majeurs de la croûte: Croûte océanique: feldspath, olivine, pyroxène Croûte continentale: feldspath, quartz, amphibole, muscovite (mica) Minéraux silicatés majeurs du manteau: olivine, pyroxène Le noyau est formé de Fe métallique (pas de silicates).

# Minéraux magmatiques principaux

### Minéraux importants de la Croûte

Minéral	Composition	Abondance
		(vol.%)
Plagioclase		31 à 41
anorthite	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	
albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	
Orthoclase		9 à 21
feldspath alcalin	KAISi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	
Quartz	SiO <sub>2</sub>	12 à 24
Amphibole	NaCa <sub>2</sub> (Mg,Fe,Al) <sub>5</sub> (Al,Si) <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	0 à 6
Biotite	K(Mg,Fe2+)3(Al,Si3)O10(OH,F)2	4 à 11
Muscovite	KAl <sub>2</sub> (Al,Si <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	0 à 8
Chlorite	(Mg,Fe2*)sAl(Al,Si3)O10(OH)8	0 à 3
Pyroxène		0 à 11
hypersthène	(Mg,Fe <sup>2+</sup> ) <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	
augite	Ca(Mg,Fe <sup>2+</sup> )Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	
Olivine	(Mg,Fe <sup>2+</sup> ) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	0 à 3
Oxydes		~2
sphène	CaTISIO <sub>5</sub>	
allanite	(Ce,Ca,Y)(Al,Fe)g(SiO <sub>4</sub> )g(OH)	
apatite	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (F,OH,Cl)	
magnétite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	
ilménite	FeTiO <sub>3</sub>	

Annexe 4: Schématisation simplifiée du cycle global du carbone. Source: IPCC AR5, *Carbon and biogeochemical cycles*, p471.

