

**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 place des technologies de capture et stockage du  
carbone dans la politique climatique.

**Perspective multidimensionnelle de l'échec de leur  
déploiement »**

Mémoire de Fin d'Études présenté par

ANDRE, Marie

En vue de l'obtention du grade académique de  
Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Finalité Gestion de l'Environnement M-ENVIG

Année Académique : 2017-2018

Directeur : BAULER, Tom

Codirecteur : PEL, Bono



## Remerciements :

Tout d'abord, je voudrais remercier Nils D. qui a été mon roc pendant cette année et dont les conseils avisés m'ont été précieux. Merci pour sa présence, son soutien, sa patience, merci de m'avoir permis de faire un pas de plus vers la réalisation de mon rêve.

Ensuite, je voudrais aussi remercier Anaïs F. dont l'aide précieuse en fin de course m'a permis de finir ce mémoire, Caroline V. et Pierre D. pour avoir pris le temps de relire mon mémoire à quelques heures du début de leurs travaux, Alexia V. pour ne pas avoir cessé de croire en moi depuis le début, Sophie T. pour avoir répondu à l'appel, même au bout du monde.

Merci à ma famille aussi, qui n'a jamais hésité à tout laisser tomber pour m'aider dès que j'en avais besoin.

Je tiens aussi à remercier mon directeur, T. Bauler et mon codirecteur B. Pel de m'avoir soutenue dans ma démarche, de m'avoir permis d'orienter ce mémoire comme je le désirais, d'avoir su donner les bons conseils permettant de mener ce travail à bien et d'avoir toujours été disponibles.

De même, je voudrais remercier toutes les personnes qui ont permis de rendre ce travail et cette année réalisable, qu'il s'agisse de mes proches, présents dans les moments de joie comme de détresse, ou les personnes rencontrées en cours, qui ont partagé ma passion et parfois mon stress, ou encore tous les scientifiques et personnes qui font avancer le combat environnemental et climatique au jour le jour, nos enfants vous disent MERCI.

Finalement, je voudrais remercier toute l'équipe de BCG, pour avoir cru en moi, pour m'avoir soutenue tout au long de l'année, pour m'avoir aidée à aménager mon temps et pour m'avoir écoutée, tous les jours, parler de mes cours, de mes lectures et de mes opinions, *You guys are the best !!*

## Résumé :

Dans un contexte d'urgence climatique, il devient pressant de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les engagements pris à Paris en 2015 prévoient que celles-ci plafonnent dans les plus brefs délais. De nombreuses mesures doivent être mises en place au plus vite afin de lutter activement contre les changements climatiques. Beaucoup de technologies ont dès aujourd'hui le potentiel de limiter nos émissions. Parmi celles-ci, nous dénombrons principalement les énergies renouvelables, le nucléaire, mais aussi les technologies de capture et stockage du carbone.

Ces dernières permettent de piéger le CO<sub>2</sub> avant, pendant ou après l'étape de combustion afin d'éviter qu'il ne soit émis dans l'atmosphère. Il est ensuite transporté et injecté dans une formation rocheuse où il devra rester plusieurs milliers d'années. Ces technologies aideraient les secteurs énergétiques et industriels à baisser leur empreinte. Cependant, elles ne sont pas encore déployées à l'échelle commerciale. Seuls certains prototypes sont opérationnels à l'heure actuelle.

Les CCS sont complexes à bien des égards : la technologie toutefois connue depuis longtemps semble être difficilement répliquable à grande échelle ; le surcoût qu'elles entraînent par leurs installations et leurs opérations les rend fort chères ; l'injection reste entourée d'incertitude quant à sa sécurité et stabilité sur le long terme ; le cadre politique et légal l'entourant reste trop faible pour servir de base à une vision long terme.

Pourtant, à partir de la fin des années 90, les CCS représentaient une part importante des espoirs dans la lutte contre le réchauffement climatique. Au début des années 2000, après un premier projet réussi en Norvège, ces technologies étaient vues comme indispensables aux stratégies de réduction des émissions. Le GIEC et l'Agence Internationale pour l'Énergie soutenaient que l'humanité éprouverait trop de difficultés à limiter son empreinte si les CCS ne faisaient pas partie de l'ensemble des solutions mises en place. Pourtant au fil des années, les échecs d'installations ont été plus courants que les succès et la vitesse de déploiement était fortement inférieure aux prévisions des spécialistes. En 2017, seuls 28 projets étaient opérationnels, bien loin de la centaine prévue au début des années 2000.

Au cours des vingt dernières années, de nombreuses circonstances se sont entremêlées et ont causé cet échec. Le coût élevé des CCS en a fait un *business case* fragile. En l'absence de marché du carbone efficient rendant les émissions payantes, les débouchés pour le CO<sub>2</sub> séparé restent minces. Les aides financières publiques devant supporter les opérateurs énergétiques dans leur démarche d'assainissements de leurs centrales n'ont pas su combler le besoin en capital. La crise de 2008 a aussi mis du plomb dans l'aile de la démarche climatique mondiale, les enjeux financiers étaient désormais prioritaires. Le cadre légal timide limitait la confiance à long terme des différents acteurs et ne permettait pas un climat de confiance.

Toutes ces raisons restent aujourd'hui encore interconnectées et leurs influences mutuelles ont rendu difficile le déploiement. À l'heure actuelle, les discussions et la recherche reprennent de plus belle et les avancées se multiplient afin de faire de réels progrès dans la réduction de nos émissions.

## Table des Matières

1. INTRODUCTION .....	1
2. APPROCHE ET MÉTHODOLOGIE .....	3
3. LES CCS, UNE BELLE INNOVATION : CADRE THÉORIQUE .....	7
4. LES TECHNOLOGIES DE CAPTURE ET STOCKAGE DU CARBONE : APPROCHE DESCRIPTIVE ..	13
4.1. <i>Introduction : vue générale</i> .....	13
4.2. <i>Aspects technologiques</i> .....	15
4.2.1. La postcombustion .....	15
4.2.2. L'oxycombustion.....	17
4.2.3. La précombustion.....	19
4.2.4. Le transport .....	20
4.2.5. Le stockage .....	20
4.3. <i>Aspects énergétiques</i> .....	22
4.4. <i>Aspects financiers</i> .....	23
4.5. <i>Enjeux climatiques</i> .....	25
4.6. <i>Impacts environnementaux</i> .....	28
4.7. <i>Aspects légaux</i> .....	30
4.8. <i>Acteurs principaux</i> .....	32
4.8.1. La recherche .....	32
4.8.2. L'Agence Internationale de l'Énergie .....	33
4.8.3. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat .....	34
4.8.4. La population .....	35
4.8.5. Les organismes de financement .....	37
4.8.6. Le paysage industriel .....	38
4.8.7. Les États.....	40
4.8.8. ONG environnementales.....	40
4.8.9. Le Marché du carbone .....	41
5. CONTEXTE HISTORIQUE DU DÉVELOPPEMENT DES CCS .....	42
5.1. <i>Le début d'une technologie prometteuse</i> .....	42
5.2. <i>Engouement du début des années 2000</i> .....	43
5.3. <i>Essoufflement de la fin des années 2000</i> .....	45
5.4. <i>Après 2014, amorce de la reprise</i> .....	48
6. RAISONS DE L'ÉCHEC .....	49
6.1. <i>Le rôle des pouvoirs publics était-il adéquat ?</i> .....	50
6.2. <i>Est-ce une technologie trop chère ?</i> .....	51
6.3. <i>Y a-t-il un lien avec le manque de signal prix pour le CO<sub>2</sub> ?</i> .....	55
6.4. <i>La crise de 2008 a-t-elle mis du plomb dans l'aile des CCS ?</i> .....	57

6.5. Quelles mesures supplémentaires auraient pu être prises ? .....	59
6.6. Pourquoi de gros projets ont-ils été abandonnés ? .....	61
6.7. Où sont donc passés les financements publics ? .....	63
6.8. Les technologies CCS sont-elles viables ? .....	65
6.9. Les CCS sont-elles à la hauteur de nos attentes ? .....	67
7. CONCLUSION.....	69
7.1. Réponse à la question de recherche .....	69
7.2. Futur des CCS.....	71
8. BIBLIOGRAPHIE.....	75
9. ANNEXES .....	82

## Table des illustrations

Figure 1 – Evolution de la consommation mondiale d'EF .....	1
Figure 2 – La courbe de Rogers.....	9
Figure 3 – Coévolution de la conception et des usages.....	12
Figure 4 – La capture du CO <sub>2</sub> par postcombustion .....	16
Figure 5 - Centrale à charbon Petra Nova à Houston, Texas, USA.....	17
Figure 6 - La capture du CO <sub>2</sub> par oxycombustion .....	17
Figure 7 - Diagramme de la combustion en boucle chimique .....	18
Figure 8 - La capture du CO <sub>2</sub> en précombustion .....	19
Figure 9 - Aperçu des options de stockage géologique du CO <sub>2</sub> .....	22
Figure 10 – Différence entre CO <sub>2</sub> piégé et évité émanant de centrales électriques .....	23
Figure 11 - Répartition des coûts de projets CCS (Cas de l'Australie) .....	25
Figure 12 - Impacts financiers de l'ajout de CCS à une centrale électrique .....	25
Figure 13 - Augmentation des températures par scénario AR5 .....	26
Figure 14 – Scénario de réduction des émissions selon l'IEA .....	27
Figure 15 - Contribution par zone technologique à la réduction des émissions dans le scénario 2DS .....	28
Figure 16 - Captage et stockage de CO <sub>2</sub> en Gt en scénario 2DS et B2DS .....	34
Figure 17 - Courbe des risques d'investissements en technologies CCS et de leurs centrales.....	39
Figure 18 - Évolution du prix du quota CO <sub>2</sub> (+110 % en 3 ans). .....	42
Figure 19 - Courbe de coûts théorique d'une innovation technologique réussie .....	44
Figure 20 - Prévion de la courbe de coûts en fonction de l'apprentissage .....	45
Figure 21 - Réduction du nombre de projets en phase de développement au cours du temps .....	46
Figure 22 - évolution des politiques CCS et du support politique. ....	47

Figure 23 – Réduction du coût des énergies renouvelables entre 2008 et 2015 aux USA en % .....	53
Figure 24 – Comparaison du coût d'évitement d'émission entre une centrale au charbon équipée de CCS et des éoliennes à puissance égale.....	53
Figure 25 – McKinsey courbe du coût net de réduction des émissions de gaz à effet de serre.....	54
Figure 26 – BCG : Courbe de coût des CCS et prix du carbone .....	56
Figure 27 – Prix du carbone nécessaire pour rendre les CCS rentables.....	57
Figure 28 - Investissements publics et privés concernant des projets CCS .....	62
Figure 29 - Scénario de décarbonisation de l'industrie SKY .....	67
Figure 30 - Source des réductions d'émission grâce aux CCS .....	68
Figure 31 - Modules de capture par Carbon Engineering .....	74
Figure 32 - Capturer nos émissions .....	74

## Table des Annexes

Annexe 1 : Liste des projets en opération.....	82
Annexe 2 : Liste des projets en construction.....	83
Annexe 3 : Liste des projets en développement.....	83
Annexe 4 : Statistiques sur les émissions de CO2 par source et par secteur.....	85
Annexe 5 : Utilisations du CO2 capturé.....	86
Annexe 6 : Scénarios de l'IEA.....	87
Annexe 7 : 29 aspects relatifs aux CCS devant être organisés par les gouvernements locaux.....	88
Annexe 8 : Clefs pour débloquer des financements.....	89
Annexe 9 : Projets arrêtés ou inactifs provenant du site du MIT.....	89
Annexe 10 : Centrales CCS opérationnelles.....	91

## Liste des Abréviations :

2DS	= 2 °C Scenario (scénario ETP de l'IEA)
ANT	= Actor-Network Theory (=Théorie de l'Acteur-Réseau)
B2DS	= Beyond 2 °C Scenario (scénario ETP de l'IEA)
BCG	= Boston Consulting Group
BD	= Boundary Dam
CC	= Changements Climatiques
CCS	= Carbon Capture and Storage
CDM	= Clean Development Mechanism (Mécanismes de Développement Propre)
CLC	= Chemical Looping Combustion (combustion dite en boucle chimique)
CO <sub>2</sub>	= Dioxyde de Carbone
COP	= Conference of the Parties (Conférence des Parties)
EEPR	= EU Energy Program for Recovery ( )
EF	= Énergie Fossile
EM	= État Membre
EOR	= Enhanced Oil Recovery (activités de récupération assistée de pétrole)
ER	= Énergie Renouvelable
ETP	= Energy Technology Perspectives (IEA)
(EU)ETS	= (European Union) Emission Trading Scheme (système communautaire d'échange de quotas d'émission = SCEQE)
GES	= Gaz à Effet de Serre
GIEC	= Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (=IPCC)
GN	= Gaz Naturel
Gt	= Gigatonne (SI)
GW	= Gigawatt (SI)
IEA	= International Energy Agency (Agence Internationale de l'Énergie)
IPCC	= Intergovernmental Panel on Climate Change (=GIEC)
ISO	= International Organization for Standardization (Organisation Internationale de Normalisation)
LCA	= Life Cycle Assessment (analyses de cycle de vie)
MIT	= Massachusetts Institute of Technology
Mt	= Mégatonnes (SI)
MW	= Mégawatt
NIMBY	= Not-In-My-Backyard
OCDE	= Organisation de Coopération et de Développement Économique
OGM	= Organismes Génétiquement Modifiés
ONG	= Organisation Non Gouvernementale
ONU	= Organisation des Nations Unies
ppm	= parts-per-million (SI)
RCP	= Representative Concentration Pathways (Profils Représentatifs d'Évolution de Concentration)
TWh	= TeraWatt / heure (SI)
UE	= Union Européenne
WEO	= World Energy Outlook

## 1. Introduction

Voilà plusieurs années que les problèmes climatiques sont au cœur de nombreux débats. L'urgence d'une transition de nos systèmes énergétiques implique un discours omniprésent tant sur les plans, politiques, économiques que sociétaux.

En effet, l'homme, et notamment depuis ces deux derniers siècles, n'a cessé d'exploiter les ressources de la Terre. Depuis la révolution industrielle, la consommation des combustibles fossiles n'a fait qu'augmenter. Suite à l'apparition de la machine à vapeur au XVIII<sup>e</sup> siècle, le charbon a été massivement exploité jusqu'à une explosion de sa production au XIX<sup>e</sup> siècle entraînant une seconde révolution industrielle. Entre 1965 et 2016, ce ne sont pas moins de 1,4 million de TWh qui ont été consommés, soit l'équivalent de la quantité d'énergie totale émise par le Soleil vers la Terre en 8 heures (Our World in data, 2018).

En parallèle, le développement massif du transport routier et du moteur à explosion a, quant à lui, banalisé l'usage du pétrole. Aujourd'hui, ce sont près de 97 000 barils qui sont brûlés chaque jour dans le monde<sup>1</sup>.

Suite aux chocs pétroliers, le gaz naturel (GN) est à son tour devenu un acteur incontournable de notre mix énergétique. En un an, ce sont  $197 \times 10^{12} \text{ m}^3$  de gaz naturel qui sont brûlés, soit le volume total de la mer rouge.

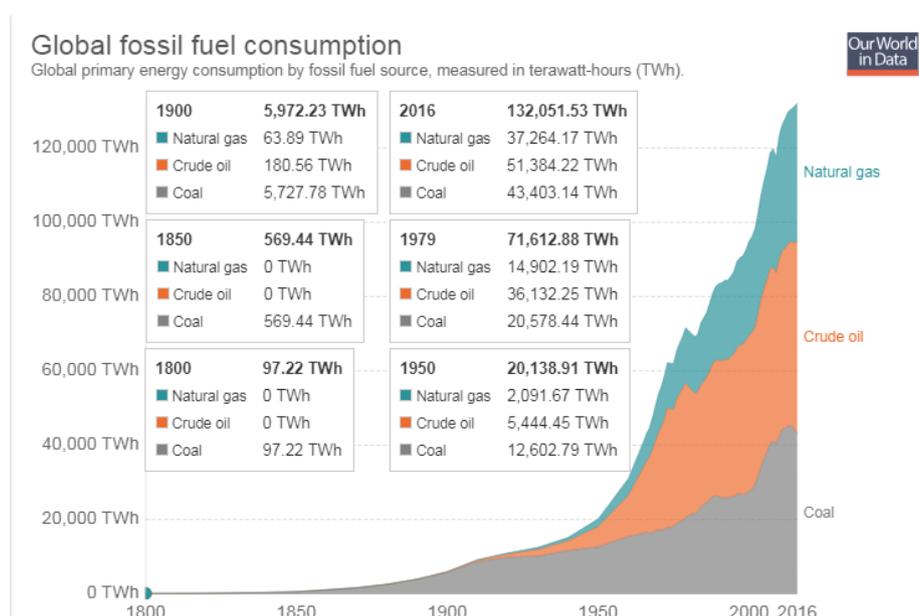


Figure 1 – Évolution de la consommation mondiale d'EF

Source : <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>

<sup>1</sup> Pour l'année 2016, en hausse de 1,6 % par rapport à 2015, source : BP Statistical Review of World Energy June 2017.

Ces développements et utilisations massives ne sont pas sans conséquence sur le réchauffement climatique puisque le propre des combustibles fossiles est que leur composition chimique repose toujours sur le carbone. Toute combustion de ces énergies émet du dioxyde de carbone<sup>2</sup> (CO<sub>2</sub>). Ce dernier est un gaz à effet de serre (GES) qui réémet les rayons infrarouges provenant de la Terre, contribuant ainsi à son réchauffement. L'effet de serre est un processus naturel permettant à notre planète d'être habitable. Cependant, l'activité humaine, par son exploitation massive des énergies fossiles (EF), son élevage intensif, sa déforestation et son utilisation de produits chimiques, a provoqué un déséquilibre important entre les émissions et l'absorption des GES. En effet, nous produisons actuellement approximativement deux fois plus de CO<sub>2</sub> que notre planète ne peut en absorber. Cela a pour conséquence un réchauffement climatique de la Terre supérieur à ses variations naturelles, augmentant la température moyenne globale de manière durable.

Cette année, le jour du dépassement tombe le 1<sup>er</sup> août ; il y a vingt ans, celui-ci tombait le 30 septembre. Ce jour marque la différence entre ce que l'homme consomme et ce que notre planète peut absorber sur une année. À l'heure actuelle, si nous ne changeons pas les choses, nous aurions besoin de 1,7 Terre pour subvenir à l'entièreté de nos besoins.

Aujourd'hui encore, la croissance démographique et la dépendance aux énergies fossiles continuent d'indiquer une tendance à la hausse des émissions. Selon les experts, la demande globale en énergie augmentera de 50 % d'ici 20 ans, compte tenu du rythme actuel de l'évolution de la population mondiale (IEA, 2017). Au vu de la faible vitesse de développement des énergies renouvelables, les EF resteront la principale source d'énergie en 2030. Le renouvelable ne sera pas suffisant pour lutter activement contre le réchauffement climatique. Le combattre est donc l'enjeu majeur de notre siècle. Des solutions existent, mais les réponses mises en place sont encore insuffisantes.

Suite aux engagements forts pris par les nations au cours du temps et dernièrement à Paris, aucune technologie visant à réduire les émissions ne peut être négligée. Pour satisfaire aux promesses faites lors de la COP21, il convient de considérer un ensemble de mesures agissant en parallèle. L'action conjointe des énergies renouvelables, du nucléaire, de l'efficacité énergétique et du captage du CO<sub>2</sub> permettront d'arriver aux objectifs de plafonnement des émissions suivi de la neutralité<sup>3</sup> carbone pendant la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Cependant, si le charbon et le gaz restent dans le mix énergétique mondial, comme cela semble être la tendance actuellement, aucune technologie seule ne saura atteindre les réductions d'émissions nécessaires pour répondre aux objectifs fixés. De plus, l'acier et le ciment, dont les procédés de production sont très émetteurs, resteront fort utilisés dans le futur.

L'une des solutions qui pourraient contribuer à une diminution des émissions serait de développer davantage le captage et le stockage du carbone (*Carbon Capture and Storage*, CCS). Cette technologie permet de capter le CO<sub>2</sub> issu de la combustion ou autre procédé émettant des gaz à teneur élevée en

---

<sup>2</sup> Les termes « carbone » et « dioxyde de carbone » ou « CO<sub>2</sub> » sont utilisés dans ce travail de manière interchangeable même si nous reconnaissons qu'au niveau scientifique cette démarche n'est pas correcte.

<sup>3</sup> Suivie d'émissions négatives.

CO<sub>2</sub> et à le renvoyer dans le sol, en réponse au découplage du carbone cycle court<sup>4</sup> et carbone cycle long<sup>5</sup>. Cela pourrait donc offrir une opportunité de neutralité qui ne saurait être atteinte d'aucune autre manière étant donné le manque de substituts technologiques de certains procédés de fabrication. Pourtant la filière CCS a du mal à décoller et à jouer pleinement son rôle dans le mix d'options de réduction des émissions anthropiques des politiques climatiques mondiales.

Dès lors, ce travail aura pour but de présenter ces technologies sous leurs différents aspects et mettra en exergue le manque d'impact qu'elles connaissent à l'heure actuelle.

Pour ce faire, nous présenterons, dans un premier temps, différents repères théoriques afin de faciliter la compréhension générale du développement d'une innovation technologique et de ses tenants et aboutissants. Ensuite, nous nous pencherons sur la description des différents aspects à prendre en compte pour cette technologie. Nous continuerons avec une mise en contexte historique de son développement ce qui nous permettra de mieux expliquer, par la suite, les causes de son échec. Enfin, en guise de conclusion, nous discuterons du futur que peuvent avoir les CCS.

## 2. Approche et méthodologie

Après cette introduction, ce chapitre décrira l'approche du sujet choisi. Au fil des lectures, nous avons pu mieux comprendre la technologie et nous nous sommes posé certaines questions, dont celle qui est devenue le sujet de recherche de ce mémoire. Nous présenterons également la manière dont le sujet y sera traité ainsi que la méthodologie utilisée. Enfin, nous introduirons les choix possibles en termes de plans et de limites.

C'est après avoir visionné une courte vidéo postée sur les réseaux sociaux par le *World Economic Forum* que nous avons découvert les technologies CCS. Visant à remettre le carbone d'où il provient, ces techniques sont uniques en leur genre. L'homme a mis en péril l'équilibre fragile de la planète en puisant le carbone géologique et en l'émettant dans l'atmosphère, déséquilibrant ainsi le cycle en place depuis des millénaires. L'idée des CCS est alors de se positionner à l'inverse des industries en captant le CO<sub>2</sub> sur le point d'être émis dans l'atmosphère et en l'injectant dans le sol, visant ainsi à boucler le cycle.

En nous intéressant davantage à ce sujet, nous avons eu l'envie d'y consacrer ce mémoire. Ce concept de pouvoir réinjecter le carbone issu d'un procédé industriel ou énergétique dans le sol a été immédiatement séduisant et nous a donné l'envie d'étudier son potentiel par des recherches approfondies. Une fois le sujet accepté et afin de mieux comprendre les enjeux, nous avons commencé par nous pencher sur l'évolution de la technologie au fil des années. Malgré une technologie connue depuis des décennies, les CCS continuent de présenter beaucoup de complexité.

---

<sup>4</sup> Échanges de carbone entre l'atmosphère, la biosphère et les océans, sur une échelle temps inférieure au siècle.

<sup>5</sup> Carbone sédimentaire stable, roches et énergies fossiles principalement, sur une échelle de temps dépassant le million d'années.

Ensuite, nous avons étudié le contexte socio-économique. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, ces technologies étaient dépeintes comme une solution indispensable à la politique climatique mondiale. Pourtant en 2017, seulement 18 unités avaient été déployées<sup>6</sup>. Il y avait donc une différence profonde entre le discours du début des années 2000, qui promettait une diffusion massive des CCS en Europe, en Amérique du Nord et en Australie et la réalité. C'est ainsi que nous en sommes venus à nous intéresser à la raison du lent<sup>7</sup> déploiement de la technologie.

De plus, il semblait y avoir une certaine disparité géographique dans la distribution des projets : certains pays paraissaient être plus actifs sur la mise en place de nouveaux projets de CCS que d'autres. Ceci a donc suscité le questionnement des différences de contextes socio-économiques en vue de tenter de comprendre les causes de l'état actuel du développement.

Nous avons pu noter une différence fondamentale entre la situation actuelle et les prévisions. La **situation actuelle** se caractérise par le nombre d'unités CCS fonctionnelles, le nombre de tonnes de CO<sub>2</sub> capturé, les subsides alloués, les cadres réglementaires qui entourent la technologie en place, les recherches effectuées, etc. Les **projections** faites au début des années 2000 décrivent, quant à elles, les prévisions à l'horizon 2020 et la généralisation des CCS sur les plus grosses unités industrielles et énergétiques grâce à un cadre politique qui devait aller de pair avec une réponse ambitieuse aux problèmes climatiques. Ces projections, effectuées par des organismes tels que l'IEA, nécessitaient un engagement franc des gouvernements qui auraient dû établir un environnement propice au déploiement massif de cette technologie. Qu'il s'agisse de mesures financières ou fiscales ou d'une réglementation encadrant les opérations, le rôle de l'État s'avère être crucial dans leur déploiement.

Notre question de recherche est donc à la fois simple et complexe : **pourquoi le déploiement des CCS fut-il un échec ?** Il convient d'expliquer l'usage du mot « échec ». Pour l'écriture de ce mémoire, nous avons considéré comme hypothèse qu'au vu de l'engouement pour les CCS au début du siècle, ces technologies auraient dû connaître un développement plus important que celui d'aujourd'hui. Dès lors, le choix de ce terme est le résultat d'une décision basée sur un jugement de valeur relativement subjectif. La notion d'échec étant fortement influencée par le point de vue personnel de chacun. Un échec pour un opposant de la technologie représente sans doute ce qu'un allié de la technologie considère comme un succès. Ainsi, ici, nous utiliserons le terme du point de vue d'un allié, même si ce mémoire n'a pas vocation de prendre parti envers les CCS. Nous considérons donc, pour ce travail, que lent développement et échec sont équivalents.

Ce travail est le fruit d'une recherche théorique basée sur une bibliographie composée d'études scientifiques, de rapports, de plans d'action, de reportages et d'articles de presse. Il résulte également d'une analyse de la documentation existante. Il est important de faire la distinction entre la **littérature académique** provenant de journaux scientifiques, du GIEC et autres sources étant revues par des pairs

---

<sup>6</sup> Voir Annexe 8.1 pour la liste des projets en opération.

<sup>7</sup> L'adjectif lent est ici employé pour caractériser la différence négative de vitesse de diffusion et d'installation d'unités dans le monde entre ce qui était prédit au début des années 2000 et ce qui été atteint en 2017.

et la **littérature dite grise**, comme les documents provenant d'organismes gouvernementaux, ou autres organisations non scientifiques (publiques, commerciales ou industrielles) — tels que les rapports de consultance — qui sont principalement rédigés pour ces mêmes organismes et souvent destinés à soutenir leurs opinions.

Les prochains paragraphes mettront en évidence la succession des différentes étapes de notre recherche sur laquelle se base la structure de ce mémoire. De l'introduction à la technologie à l'analyse socio-économique des CCS, ces étapes nous permettent d'en venir au **pourquoi**, question centrale de ce document.

En effet, après nous être familiarisées avec la technologie et la problématique, la première phase de recherche fut concentrée sur le « *pourquoi* » de l'échec d'une innovation. Cette question principale s'inscrit dans un cadre théorique spécifique. En prenant du recul par rapport au thème central que sont les CCS, nous nous sommes intéressés de manière plus large au développement et à la généralisation des innovations afin d'étudier les facteurs de succès ou d'échec d'adoption d'une nouvelle technologie. Le coût est-il prohibitif ? Le *timing* est-il adéquat ? etc. Cela a permis de construire une analyse des perspectives multidimensionnelles du développement de CCS en vue d'identifier par le biais de la théorie les facteurs qui ont pu jouer un rôle dans le cas des CCS.

L'exploration de la théorie de l'innovation nous a permis de découvrir un modèle théorique intéressant pour l'analyse de la situation : le modèle de l'intéressement, aussi appelé **théorie de l'acteur réseau**. Dans le cas de l'étude du déploiement des CCS, il est ardu de se baser sur la majorité de la littérature concernant les innovations pour la simple raison que l'on manque de recul. En effet, bon nombre d'analyses de succès ou d'échec d'innovations se font généralement a posteriori, c'est-à-dire qu'elles sont capables de rendre compte du contexte général, du manque de marché ou de la politique instable. Par contre, elles manquent de vue sur le chaos et la confusion qui règnent souvent lors du développement en cours d'une nouvelle technologie<sup>8</sup>.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés aux CCS en tant qu'innovations. Si la dimension technique est importante, la compréhension des autres aspects tels que leurs caractéristiques économiques, le cadre légal et politique le sont également. Les dimensions énergétiques et environnementales occupent, elles aussi, une place importante dans cette partie descriptive. Ensuite, nous évoquerons les acteurs principaux qui jouent un rôle déterminant au niveau du déploiement de la technologie, avec principalement le paysage industriel.

Après quoi, pour mieux comprendre la raison pour laquelle nous qualifions le déploiement des CCS de **lent ou d'échec**, nous tenterons de dépeindre le contexte historique. Nous considérons la fin des années 1990, début des années 2000 comme point de départ de l'analyse et comme fondement pour la suite. Cette période a été choisie car elle marquait le début de l'abondance des recherches. Nous parlerons donc de la situation originelle, des projections faites à l'époque et enfin de l'évolution effective.

---

<sup>8</sup> Même si la technologie CCS n'est pas nouvelle au sens scientifique, elle est considérée comme telle au vu de son faible état de maturité sur le marché.

Par après, la recherche bibliographique se poursuit pour tenter d'identifier les différents événements, ou raisons structurelles qui auraient pu mener à la situation actuelle. Dans notre monde, les relations de cause à effet sont rarement linéaires et évidentes. Afin d'offrir une meilleure compréhension de ces corrélations, nous avons scindé la question centrale du **pourquoi** en plusieurs sous-questions permettant chacune de mieux appréhender les différents éléments de réponse.

Ainsi, nous pouvons résumer rapidement ces différentes parties comme suit : la partie théorique répond au **comment**, soit la manière dont le sujet est abordé ; la partie descriptive répond au **quoi**, soit l'objet du mémoire ; la partie historique met en avant l'existence du problème ; enfin, la dernière partie tente de répondre au **pourquoi** de l'existence de ce dernier.

Dans ce travail, nous nous sommes servis d'articles et d'études publiées par des journaux scientifiques tels que « Global Environment Change », « Environmental Science and Policy ». Nous avons aussi consulté des analyses effectuées par des cabinets de consultance pour tenter de faire le parallèle entre les conclusions théoriques émises précédemment et les causes historiques potentielles. Des rapports intergouvernementaux ainsi que des publications d'associations s'apparentant à du lobby font également partie des sources mobilisées.

Cette étude ne se limite pas à une zone géographique particulière. Il comprend la dimension internationale et nous permet ainsi d'observer une différence sur leur développement en Amérique du Nord, en Europe ou en Australie, etc.

Il est à souligner que cette recherche vise uniquement les technologies de capture à source ponctuelle, par opposition aux technologies de capture directe du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Ces dernières sont encore marginales dans le paysage industriel et restent à l'état de prototype. Dans la littérature, le terme CCS se rapporte à la capture en source ponctuelle et c'est une qualification que nous suivrons dans ce document. De plus, l'analyse se veut pluridisciplinaire, car les enjeux climatiques et leurs politiques de réponse le sont aussi. Si des aspects purement technologiques caractérisent une dimension importante de l'analyse, ils sont intimement liés à des aspects politiques, sociaux et économique-financiers.

### 3. Les CCS, une belle innovation : cadre théorique

Les chapitres précédents ont introduit la problématique et présenté ce qui va être traité dans ce mémoire. Dans cette partie, nous nous pencherons sur l'aspect théorique des innovations. Comme explicité précédemment, pour tenter de répondre au **pourquoi**, nous nous basons sur la théorie relative aux innovations. Nous développerons le choix de ce cadre théorique afin de le justifier au mieux.

La capture et stockage du carbone sont des technologies complexes, mais prometteuses et vraisemblablement indissociables de la politique climatique à venir. Malgré l'engouement du début des années 2000, l'élan n'a pourtant pas pu être conservé. Très peu de projets ont effectivement vu le jour et les projections effectuées au début des années 2000 n'ont pas réussi à se réaliser. Comment expliquer qu'un outil, tant soutenu par la communauté scientifique et politique, n'ait pas réussi à s'imposer et se généraliser ?

Pour essayer de répondre à cette question, il convient de s'intéresser à ce qu'est une innovation et ce que sont ses mécanismes de développement et de déploiement. Comment se fait-il qu'elle se déploie à grande échelle ou qu'elle échoue ?

Il existe plusieurs types d'innovation en fonction de l'objet sur lequel elle porte. Le Manuel d'Oslo de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) tente de présenter un cadre commun d'interprétation des données qui lui sont relatives. Il définit :

*« Une innovation technologique de procédé dans le cas de l'adoption de méthodes de production technologiquement nouvelles ou sensiblement améliorées, y compris les méthodes de livraison du produit. Ces méthodes peuvent impliquer des modifications portant sur l'équipement ou l'organisation de la production, ou une combinaison de ces modifications, et peuvent découler de la mise à profit de nouvelles connaissances. Ces méthodes peuvent viser à produire ou à livrer des produits technologiquement nouveaux ou améliorés, qu'il est impossible de produire ou de livrer à l'aide de méthodes classiques, ou essentiellement à augmenter le rendement de production ou l'efficacité de la livraison de produits existants. »*  
(OCDE, 2005)

Beaucoup d'économistes (T. Levitt, C. Freeman, M. Porter, etc.) se sont intéressés à la question des innovations, du changement et de leur dynamique. Pourtant, il n'existe pas de consensus quant à la définition du concept. Le terme est utilisé dans le cadre de situations très variées. Ainsi, même si la littérature est abondante, elle reste très fortement fragmentée. Ce concept renvoie néanmoins toujours à la notion d'une nouvelle réalité par rapport à une situation de référence précédant cette même nouveauté. Selon Mohr (1969), l'innovation sous-entend une utilisation de celle-ci par les acteurs à qui elle est destinée. Dans la littérature, il est souvent question de transaction commerciale : l'invention passe au stade d'innovation lorsque la première transaction est réussie. Schumpeter (1942) nous dit, dans son livre *Capitalisme, socialisme et démocratie*, que « l'impulsion fondamentale qui met et

*maintient en mouvement la machine capitaliste est imprimée par les nouveaux objets de consommation, les nouvelles méthodes de production et de transport, les nouveaux marchés, les nouveaux types d'organisation industrielle — tout élément créé par l'initiative capitaliste* ». Il s'agit donc bien d'une « destruction créatrice » qui détruit l'ancien pour créer le nouveau.

De manière plus générale, il s'agit du développement d'une idée, d'une invention ou d'une découverte scientifique en quelque chose que les consommateurs perçoivent comme nouveau et utile. Aussi, le propre d'une innovation est, une fois sur le marché, d'être acceptée ou rejetée. Le succès ou l'échec d'une technologie innovante n'est pas un processus simple ni linéaire. Selon C. Freeman (1997), l'innovation ressemble à un processus de couplage entre le marché et la technologie<sup>9</sup> qui évoluent tous deux de façon imprévisible, voire même aléatoire.

Il n'est pas aisé de déterminer les facteurs de succès et d'échec de déploiement. Certaines théories, comme le **modèle de la diffusion**, se sont intéressées à la compréhension de la diffusion d'une innovation au sein d'une population d'adoptants. Il s'agit de la théorie du déterminisme classique qui se base sur la détermination de critères agissant sur la rapidité avec laquelle une innovation se propage et est adoptée. L'auteur de cette théorie, E. Rogers (1995), définit plusieurs phases dans l'adoption par un groupe social :

- *la connaissance* : l'individu est exposé à l'innovation et il réagit en fonction de son profil personnel ;
- *la persuasion* : l'individu établit un jugement au sujet de l'innovation et réagit ;
- *la décision* : l'individu engage un comportement permettant d'adopter ou de rejeter l'innovation ;
- *la confirmation* : l'individu veut renforcer son choix.

Cette conception quantitative se base sur le taux d'adoption ou taux de diffusion, c'est-à-dire le pourcentage d'individus ayant adopté l'innovation dans un système social donné. Ainsi, chaque individu d'un système social peut poser deux choix : soit l'adopter, soit la refuser. Ceci détermine un rythme, une vitesse d'adoption. Graphiquement, l'évolution de ce taux se traduit par la « courbe en S d'innovation ». En créant et analysant cette courbe, les chercheurs adhérant à cette théorie ont tenté de déterminer les facteurs déterminant la forme de cette courbe. Ainsi, ils considèrent que les innovations ne peuvent compter que sur leurs qualités intrinsèques pour se répandre à travers la société par effet de démonstration. La technique n'est pas remise en cause et c'est aux utilisateurs de s'adapter.

---

<sup>9</sup> Les paragraphes suivants emploieront de manière interchangeable « innovation » et « technologie », nous recommandons au lecteur de garder à l'esprit qu'il s'agit d'innovation technologique ou de technologie innovante et que dans ce cas-ci ces termes sont équivalents.

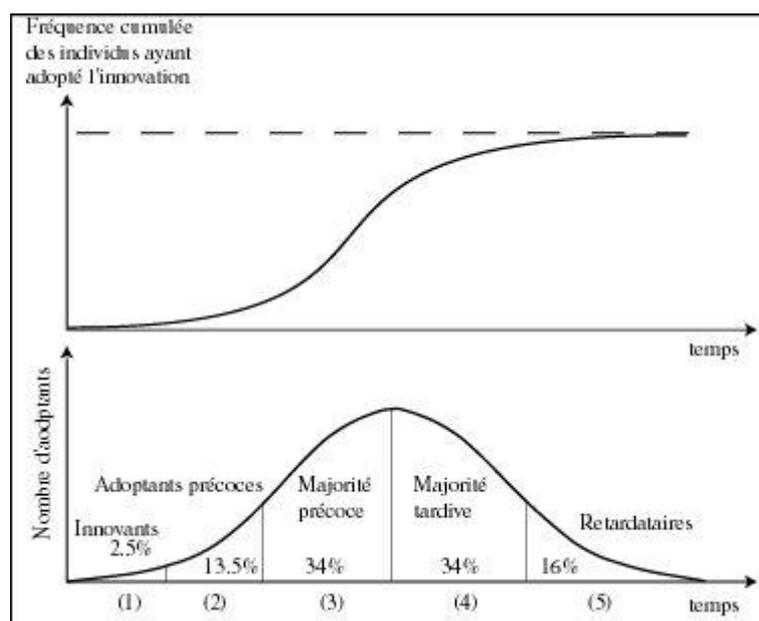


Figure 2 – La courbe de Rogers.

Source : E. Rogers, 1995

Le modèle de la diffusion considère que l'innovation se répandra si ses caractéristiques en valent la peine. Cela signifierait que son succès serait identique sur différents continents à condition que ses propriétés intrinsèques restent les mêmes. Or, l'histoire montre de manière répétée que ce qui fait le succès d'une innovation en Amérique peut en faire son échec en Europe, que ce soit pour une adoption individuelle ou générale. Le modèle de la diffusion présente donc des lacunes certaines. Néanmoins, il permet de mieux percevoir l'importance qu'ont les caractéristiques intrinsèques d'une innovation sur son environnement et donc son déploiement.

En ce qui concerne les CCS, malgré les projets précédents réussis dans d'autres pays, la technologie n'a pas continué son développement selon la vitesse escomptée. Il faut alors accepter que, pour plusieurs raisons, les acteurs clés nécessaires à la diffusion n'aient pas été convaincus. La recherche de cette raison est l'objet même de ce mémoire.

Avec un recul suffisant, il est possible d'analyser les conditions socio-économiques dans lesquelles une innovation a prospéré ou échoué. La détermination des causes de l'échec telles que l'absence de marché ou les coûts trop élevés est un exercice moins laborieux. Il existe énormément de documents théoriques à ce propos. Ce genre d'analyse n'a que peu de valeur ajoutée dans le cas présent de l'étude du développement des CCS étant donné le faible recul dont nous disposons sur ce plan, après seulement trente années écoulées. Il s'agit d'un processus « en cours », qui est loin d'être fini et qui évoluera encore fortement dans les années à venir au même titre que les enjeux climatiques. Le piège des explications rétrospectives est qu'elles ne rendent peu ou pas compte du contexte exact dans lequel les décisions ont été prises. L'analyse de celui-ci comprend notamment la confusion dans laquelle les opérations ont été menées ou encore la nature antagoniste des acteurs. L'innovation est, à vrai dire,

une source d'instabilité et d'imprévisibilité qu'aucune méthode ne parvient à maîtriser parfaitement. La littérature concernant l'évolution des innovations « en temps réel » s'est cependant fortement étoffée ces dernières années. Nous pouvons notamment citer le récit « *The soul of a new machine* » de J. T. Kidder (1981) qui décrit le procédé de développement d'un micro-ordinateur aux USA. Même si dans ce cas, il s'agit d'une adoption par les individus plutôt que par une politique, cet exemple traduit de l'intérieur la confusion et le « hasard » décisif qui font les particularités du processus de développement. Cette documentation permet de soutenir l'identification de facteurs contribuant à l'acceptation des changements radicaux que peuvent impliquer les innovations technologiques.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons cherché à appuyer notre analyse à l'aide d'un modèle qui prenne en compte l'aspect actuel, « *in the making* » du développement des CCS. De plus, étant donné la disparité géographique des projets qui ont effectivement vu le jour (aux États-Unis, au Canada et en Norvège notamment), il est réducteur de dire que l'innovation connaîtra un essor géographiquement similaire grâce à ses qualités technologiques intrinsèques. D'autres modèles théoriques semblent permettre de mieux comprendre les difficultés de déploiement que les CCS connaissent.

Le contexte socio-économique dans lequel une innovation se développe est en évolution permanente. Cette dernière s'inscrit dans un paysage d'acteurs variés qui agiront en sa faveur ou défaveur en fonction de toute une série de critères. Le **modèle de l'intéressement** ne sépare pas l'innovation de son contexte, mais insiste sur l'existence d'une multitude de liens qui les unissent. À l'inverse du modèle de la diffusion, ce modèle conteste l'idée qu'une technologie se diffuse, créant ainsi d'elle-même ses usagers. M. Akrich nous dit que l'innovation c'est « l'art d'intéresser un nombre croissant d'alliés qui vous rendent de plus en plus forts » (1988). Aussi appelée sociologie de la traduction, elle a donné naissance à une école de pensée appelée **théorie de l'acteur réseau** (*Actor-Network Theory*, ANT) développée au centre de sociologie de l'innovation de l'École des mines de Paris (A. Mahil et al., 2015). Ce nom montre la volonté de dépasser la dichotomie classique entre micro et macro, entre l'acteur et sa structure.

Ce modèle nous permet de comprendre comment les innovations se généralisent et d'appréhender ses facteurs de succès. Il soutient que leur avenir sera fortement lié aux acteurs et institutions qui décideront de la faire avancer ou non. Le modèle de l'intéressement considère que le processus d'innovation est composé de va-et-vient et de **boucles itératives**. Ce tourbillon perpétuel se transforme au gré des épreuves que les parties prenantes lui imposent. Les adoptants se retrouvent donc à jouer un rôle indéniable dans le développement puisque cette dernière est en interaction permanente avec eux. Ainsi, il soutient que le choix de l'adoption revient presque entièrement aux usagers et qu'il est nécessaire d'adapter l'innovation à ceux-ci et non l'inverse comme le soutient le modèle de la diffusion. Il est dès lors important de mettre en place, dès le début du processus, des démarches d'intéressement du public, d'où est tiré le nom du modèle.

La théorie de la traduction a été développée par B. Latour, M. Callon et M. Akrich. Il s'agit d'une métaphore pour montrer l'importance d'un langage commun à toutes les parties prenantes lors du

développement de l'innovation. Ainsi, cette théorie supporte l'importance d'individus qui agissent comme porte-parole et qui jouent un rôle déterminant quant à l'implication des adoptants. Cette théorie sociologique met l'accent sur « l'innovation qui est en train de se faire » (*in the making*, en anglais, comme développé par B. Pei, 2012) et considère les aspects techniques et sociaux indissociables les uns des autres et en interaction permanente. Ainsi, ses fondateurs sont en opposition avec les approches qui séparent l'humain du non-humain, les artefacts deviennent aussi des acteurs. Ils estiment que politique/société et sciences/technologies doivent être considérées sur un même niveau et de manière symétrique. Les premiers théoriciens du mouvement ont interprété des phénomènes empiriques afin d'expliquer le succès ou l'échec d'une théorie<sup>10</sup>. La rédaction d'une sorte de compte-rendu portant sur la manière dont les acteurs parviennent ou non à résoudre les problèmes lors du déploiement devient cruciale. Il s'agit donc principalement d'un travail descriptif, mais qui repose sur des notions abstraites telles que :

- *réseau* : métaphore pour saisir le mode d'existence des collectifs (M. Dubois, 2017). Le réseau ne connaît pas de délimitation ;
- *actant* : acteur, il s'agit d'une entité faisant partie du récit/réseau et qui a la capacité d'en modifier le cours ;
- *humain* : résultant d'un ou plusieurs humains regroupés ou non en organisations ;
- *Non-humain* : n'ayant pas de lien direct avec l'humain, par exemple la technologie, les lieux, les dispositifs, etc.

Le processus de traduction est composé de quatre étapes. Elles peuvent se chevaucher, mais il s'agit de moments précis dans le développement de l'innovation : la problématisation, l'intéressement, l' enrôlement et la mobilisation (M. Callon, 1986).

- *La problématisation* : elle fait référence à l'identification d'un problème auquel l'innovation sera appelée à répondre, des objectifs pour y arriver, des acteurs à impliquer ainsi que leurs intérêts.
- *L'intéressement* : il consiste à effectivement impliquer les acteurs identifiés, leur faire prendre part au processus pour favoriser les alliances bénéfiques au développement de l'innovation.
- *L' enrôlement* : il s'agit d'un intéressement réussi. Chaque acteur a un rôle qu'il s'agit de coordonner afin d'optimiser les interactions et de limiter les oppositions.
- *La mobilisation* des alliés est cruciale : grâce aux porte-paroles qui représentent les autres acteurs et qui « traduisent » afin de créer l'alignement des parties prenantes, le « réseau » sera mobilisé et l'innovation pourra se déployer au sein du marché. L'action collective contribuera à renforcer ce déploiement ou, au contraire, à le freiner. C'est à cette étape que les compromis sont atteints par va-et-vient de boucles itératives. Cette étape devrait donner lieu soit à une situation de stabilité en conduisant au succès de déploiement, soit à une situation instable en introduisant la notion d'échec de diffusion. La traduction peut se transformer en « trahison » lorsque les porte-paroles agissent en désaccord avec les idées exprimées et ralentissent, ou même bloquent le processus d'étapes successives nécessaires au bon développement de

---

<sup>10</sup> Voir par exemple « l'État face à l'innovation technique. Le cas du véhicule électrique » par M. Callon en 1979.

l'innovation. Cette controverse conduit à une incertitude profonde qui risque de renforcer les positions individuelles. Dans le cadre de ce mémoire, c'est cette étape qui sera analysée. Nous retrouvons les caractéristiques de la **trahison**, les promesses de financements qui ne sont finalement pas accordés, la différence entre le discours des scientifiques et les actions des politiques, tant d'éléments qui seront développés plus loin dans ce travail.

Le concept des boucles itératives<sup>11</sup> est simple : l'innovation se transforme par les influences des acteurs et lorsqu'un équilibre intermédiaire est trouvé, ceci se manifeste par la diffusion d'un prototype, en accord avec le compromis atteint. Celui-ci sera amélioré jusqu'à l'apparition d'un prototype suivant, et ce, de manière perpétuelle. Ainsi, l'implication d'acteurs de différents horizons permet une convergence entre co-conception<sup>12</sup> et trajectoires d'usage. Il est donc imaginable que cela favorise l'apprentissage et l'adoption par un public plus large.

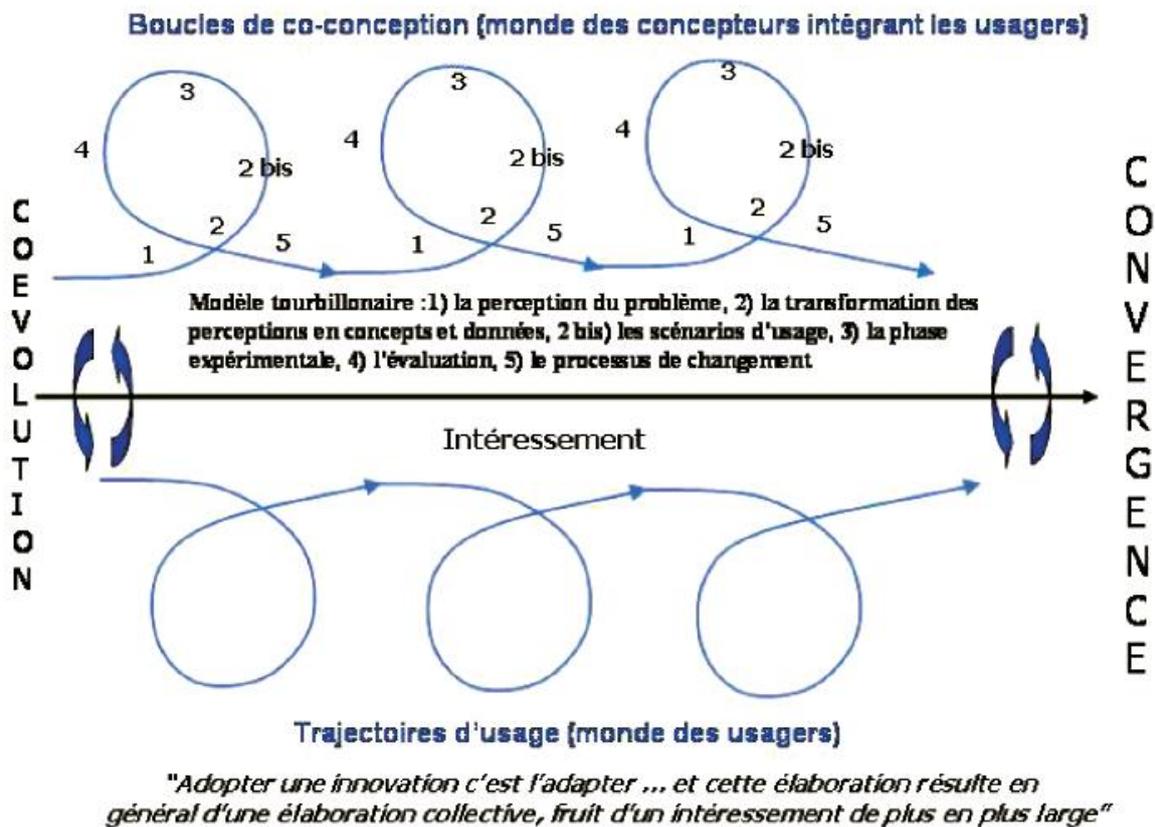


Figure 3 – Coévolution de la conception et des usages

Source : A. Grimand et al. 2006

<sup>11</sup> Boucles itératives et boucle de co-conception renvoient au même concept de cycle dans le développement d'une innovation.

<sup>12</sup> Terme employé par les auteurs pour parler de l'implication des usagers dans le processus de conception.

Dans le cadre de ce mémoire, la théorie de l'acteur-réseau offre une base solide qui met en lien les qualités intrinsèques des CCS et le contexte socio-économique dans lequel elles se sont développées depuis le début des années 2000. Néanmoins, l'ANT, comme toute théorie sociologique, présente certaines faiblesses qu'une analyse objective se doit de garder à l'esprit. Selon elle, les acteurs ou actants ont tous un rôle équivalent les uns des autres en ce qui concerne le déploiement. Ceci conduit à plusieurs difficultés. D'une part, le nombre élevé d'actants, étant donné la capacité d'influence de toutes les entités sur le récit, humain ou non humain, donne lieu à un nombre faramineux et lors d'une étude il est presque impossible d'analyser toutes ces relations. Il faut alors faire des choix qui se retrouvent être arbitraires, car la théorie ne les guide ni ne les justifie. D'autre part, l'ANT soutient que tous les acteurs ont le même poids, il n'y aurait pas de différence entre, par exemple, le président des États-Unis et un employé de la comptabilité de Shell. Elle manque donc de relief. Cette absence de hiérarchie ne peut que très difficilement s'appliquer en pratique et rend parfois difficile l'application de la théorie à des cas réels.

## 4. Les technologies de capture et stockage du carbone : approche descriptive

Maintenant que nous nous sommes penchés sur le **comment**, tournons-nous vers le **quoi**. La partie précédente a développé l'aspect théorique sur lequel se base ce mémoire. Le choix de la théorie de l'acteur réseau guidera la manière dont nous nous intéresserons au développement de la technologie. Pour le chapitre qui vient, il s'agira d'un regard strictement descriptif de ce que sont les CCS. Nous tenterons de brosser le portrait le plus complet possible en touchant aux aspects techniques, mais aussi énergétiques, financiers, environnementaux et légaux. Nous parlerons aussi des acteurs principaux. Le but de cette partie est de donner au lecteur les connaissances nécessaires à une meilleure compréhension de l'analyse qui suivra. Il est important de noter que l'ordre des sous-chapitres est arbitraire et ne reflète pas d'importance.

### 4.1. Introduction : vue générale

Le procédé de capture ou captage du CO<sub>2</sub> consiste à le **piéger** d'un gaz dont la concentration (en CO<sub>2</sub>) est très élevée. Il s'agit d'un processus se déroulant principalement avant, pendant ou après une étape de combustion afin d'éviter qu'il ne soit libéré dans l'atmosphère. Le gaz carbonique est récupéré lors de processus industriels fort émetteurs, tels que la production d'énergie, d'acier ou de ciment. Le CO<sub>2</sub> peut aussi être capté lors du traitement du gaz naturel. De manière générale, le dioxyde de carbone peut composer jusqu'à 70 % des gisements de gaz. Il convient de les séparer afin que le GN soit conforme aux prescriptions de vente. Les techniques utilisées sont alors similaires.

Le secteur de l'électricité et de la chaleur comptait pour 42 % des émissions mondiales en 2015. Le charbon et le gaz sont à ce jour les combustibles les plus utilisés. Le secteur industriel, avec principalement la production de fer et d'acier, le raffinage de produits pétroliers, le ciment et la

pétrochimie, comptait en 2015 pour 19 % des émissions globales<sup>13</sup>. Le poids de ces procédés dans les émissions mondiales de GES est donc lourd et l'installation d'unités capables de limiter les rejets de CO<sub>2</sub> semble décisive pour atteindre les objectifs climatiques.

Bien qu'il existe d'autres possibilités, les technologies CCS traitées dans ce mémoire sont dites de *source ponctuelle*<sup>14</sup>, la combustion est une étape nécessaire<sup>15</sup> afin que le gaz carbonique soit en quantité et concentration suffisantes. Le CO<sub>2</sub> une fois séparé est obtenu principalement sous forme gazeuse ou parfois liquide. Généralement, le dioxyde de carbone extrait n'est pas parfaitement pur et est mélangé à d'autres gaz minoritaires.

Après la capture, le CO<sub>2</sub> doit être **transporté**. Il est alors comprimé. Le transport s'effectue soit par pipeline, soit par bateau, ou encore, par camion. Il est ensuite **stocké** dans des formations géologiques de sous-sols permettant sa séquestration sur le long terme, typiquement plusieurs milliers voir millions d'années. Il arrive aussi que le CO<sub>2</sub> soit revalorisé, il transite alors vers un autre site industriel où il sera utilisé comme matière première<sup>16</sup>.

Ces technologies permettent d'éviter jusqu'à 99 % des émissions de CO<sub>2</sub> pour la combustion concernée. Dès lors, ces émissions ne s'accumuleront pas dans l'atmosphère et ne participeront pas au réchauffement climatique. Depuis leur apparition, l'optimisme a été de mise concernant les CCS et leur capacité à s'attaquer aux changements climatiques (CC). Après tout, une grosse partie de la technologie concernée était déjà utilisée dans une autre industrie comme la production de gaz carbonique alimentaire.

Il est important de noter que les CCS sont des technologies dites « de transition » et permettent d'éviter l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de certaines activités dans l'attente d'une transition complète de nos systèmes énergétiques et industriels vers des systèmes bas carbone voir zéro-carbone. Il ne s'agit pas d'une solution long-terme, mais plutôt d'un levier important pour satisfaire aux engagements pris à Paris en 2015.

---

<sup>13</sup> Voir Annexe 8.4.

<sup>14</sup> D'autres technologies sont en phase de développement, il s'agit principalement d'absorber le CO<sub>2</sub> directement dans l'atmosphère. Ces nouveautés sont toujours au stade de prototypes au vu des nombreuses difficultés que la faible concentration entraîne.

<sup>15</sup> Ou, il peut aussi s'agir de séparation du CO<sub>2</sub> du GN, qui est alors dans des proportions similaires à celles d'une combustion.

<sup>16</sup> Voir Annexe 8.5.

## 4.2. Aspects technologiques

Les CCS sont des technologies complexes à mettre en place. Les paragraphes suivants décriront, de manière simplifiée, les procédés possibles ainsi que les difficultés et opportunités qui leur sont afférentes.

Parmi les technologies de captage en source ponctuelle, il existe 3 techniques :

- *la postcombustion,*
- *l'oxycombustion,*
- *la précombustion.*

Le CO<sub>2</sub> est ensuite liquéfié, transporté et injecté dans le sol afin de garantir son stockage à long terme.

### 4.2.1. La postcombustion

La postcombustion se déroule **après l'étape de combustion**. Dans ce cas, l'air est utilisé comme comburant et l'O<sub>2</sub> qu'il contient réagit avec le combustible pour former du CO<sub>2</sub> et de la vapeur d'eau. L'air étant composé d'azote (N<sub>2</sub>) à 78 %, les gaz de combustion en contiennent de manière majoritaire, ainsi que du CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et d'autres résidus tels que des NO<sub>x</sub>, des SO<sub>x</sub> et autres composés organiques volatils dans le cas d'une combustion incomplète. D'autres éléments peuvent aussi se retrouver dans les gaz sortants en fonction de la composition de l'air entrant.

Il s'agit donc de séparer le CO<sub>2</sub> du reste des gaz de combustion. Le procédé le plus commun est la capture par absorption avec un solvant. On utilise alors une substance présentant une affinité pour le CO<sub>2</sub> et étant capable de s'y lier. Ainsi, lorsque le solvant et les fumées entrent en contact, des liaisons chimiques se forment entre celui-ci et le CO<sub>2</sub>. Le reste des gaz de combustion, appauvri en CO<sub>2</sub> est émis normalement dans l'atmosphère. Ensuite, il faut arriver à briser les liaisons afin de régénérer le solvant et de libérer et isoler le CO<sub>2</sub>. Le choix du solvant est crucial pour l'efficacité du processus et son coût. L'affinité entre les substances doit être la plus élevée possible, mais d'autres facteurs sont tout aussi importants tels que la facilité de régénération du solvant, mais aussi sa disponibilité et son coût à l'achat. Des amines telles que le monoéthanolamine sont les plus utilisées. Par contre, d'autres substances pouvant baisser les coûts, diminuer l'énergie ou le temps de régénération sont toujours à l'étude. La séparation par absorption au solvant est aussi une technique utilisée en cas de séparation GN/CO<sub>2</sub> lors du traitement du gaz.

La postcombustion existait avant que les CCS ne soient imaginées comme moyen de combattre le réchauffement climatique. L'adaptation de ce procédé à la capture du CO<sub>2</sub> s'est avérée compliquée étant donné l'impact des impuretés oxydées retrouvées dans les gaz de combustion et le volume important de gaz à traiter. Ces difficultés sont accompagnées de pénalités importantes en termes énergétiques.

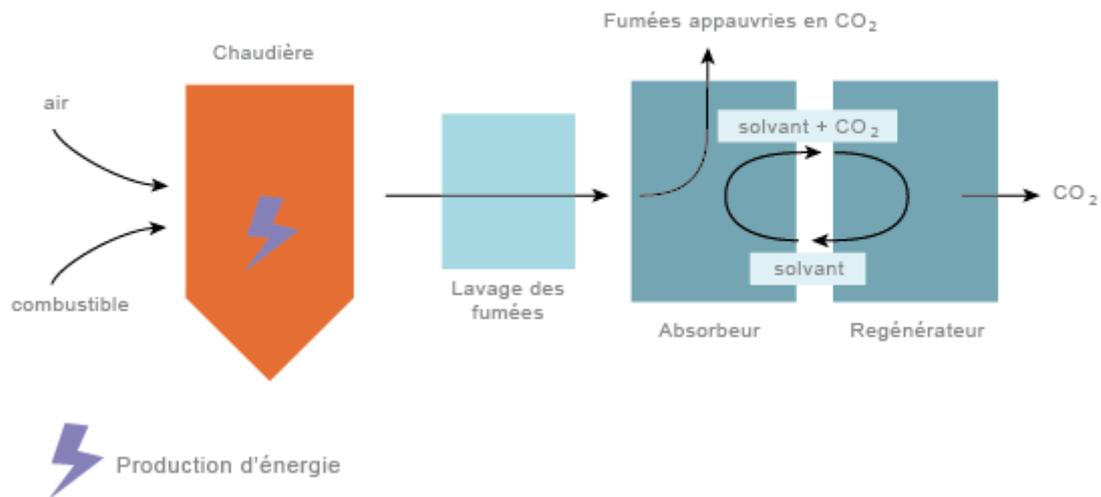


Figure 4 – La capture du CO<sub>2</sub> par postcombustion

Source : © Connaissance des Énergies

Il existe d'autres moyens de séparation que l'absorption par solvant comme :

- *la cryogénie* : où les gaz de combustions sont refroidis jusqu'à -120 °C pour congeler le CO<sub>2</sub> ;
- *le captage par adsorption* : où le CO<sub>2</sub> des fumées est adsorbé sur de la roche poreuse comme du charbon actif ;
- *le captage par cycle calcium* : où le CO<sub>2</sub> se lie à de la chaux vive pour faire du calcaire. Lorsqu'on chauffe le calcaire, il libère le CO<sub>2</sub> et la chaux vive est régénérée ;
- *le captage par séparation membranaire* : où le CO<sub>2</sub> est séparé physiquement grâce à une membrane poreuse sélective.

Ces moyens sont encore à l'étude et ne semblent pas avoir encore pris le pas sur la séparation à la monoéthanolamine, à l'heure actuelle.

La postcombustion est un procédé pouvant être mis en place sur des installations existantes sans nécessiter de transformations trop drastiques, c'est ce qui est appelé le *retrofit*. Cependant, la concentration en CO<sub>2</sub> des gaz de combustion n'étant pas maximale, le volume important de gaz à traiter demande une surface d'opérations non négligeable rendant l'opération compliquée si la centrale de base ne dispose pas de l'espace nécessaire.



Figure 5 - Centrale à charbon Petra Nova à Houston, Texas, USA

Source : Dubin, 2017

#### 4.2.2. L'oxycombustion

Lors de l'oxycombustion, c'est de l'**oxygène pur** qui est utilisé pour la combustion à la place de l'air. Il n'y a donc pas de  $N_2$  dans le foyer de combustion ce qui évite de le retrouver dans les gaz de combustion. Les produits de la combustion contiennent presque uniquement du  $CO_2$  et du  $H_2O$  dû à l'absence de toute autre substance dans le comburant. Des étapes de lavage ainsi que de déshydratation des fumées sont suffisantes pour les isoler. La déshydratation permet d'écarter la vapeur d'eau et le lavage va séparer les autres composants potentiels des gaz de combustions. Il s'agit de procédés extrêmement communs quant au traitement des fumées industrielles.

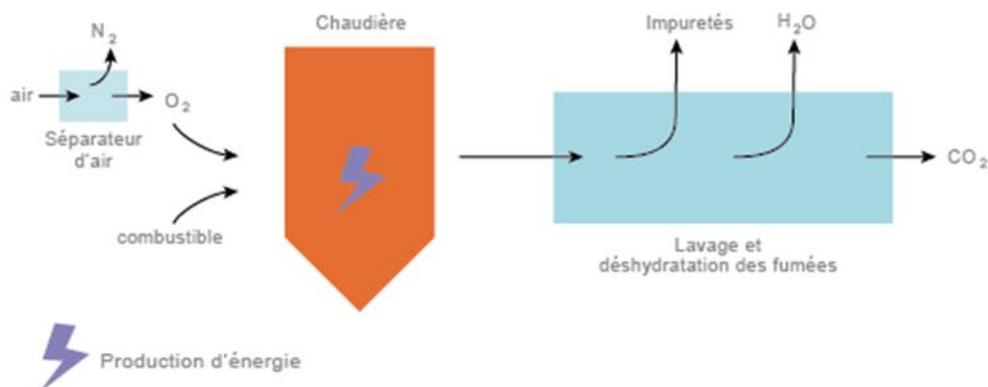


Figure 6 - La capture du  $CO_2$  par oxycombustion

Source : © Connaissance des Énergies

Même si cette technique semble simple, elle nécessite la production de grandes quantités d'oxygène pur qui peut s'avérer compliquée et coûteuse. L'oxygène est obtenu par séparation des composants de l'air, par exemple par distillation. Celui-ci est envoyé dans une colonne et grâce à la différence de températures de liquéfaction de l'oxygène, de l'azote et des autres composants, ils se séparent lorsque l'ensemble est refroidi.

Cependant, le coût de séparation pourrait être évité par une nouvelle technologie qui semble prometteuse : la combustion dite en boucle chimique (CLC - *Chemical Looping Combustion*). Au lieu de pulvériser l'oxygène sous forme gazeuse, il serait fixé sur un support métallique qui serait ensuite utilisé dans le procédé de combustion. L'oxygène se retrouverait donc contenu dans les particules **d'oxyde métallique**. Dans un premier temps, le métal s'oxyderait au contact de l'air et s'enrichirait en  $O_2$ . Dans un second temps, cet oxyde de métal se réduirait au contact du combustible fossile. Avec ce procédé, les émissions seraient essentiellement constituées de  $CO_2$  et d' $H_2O$  comme dans le cas de l'oxycombustion classique. Après plusieurs boucles, le métal devra être rechargé en oxygène.

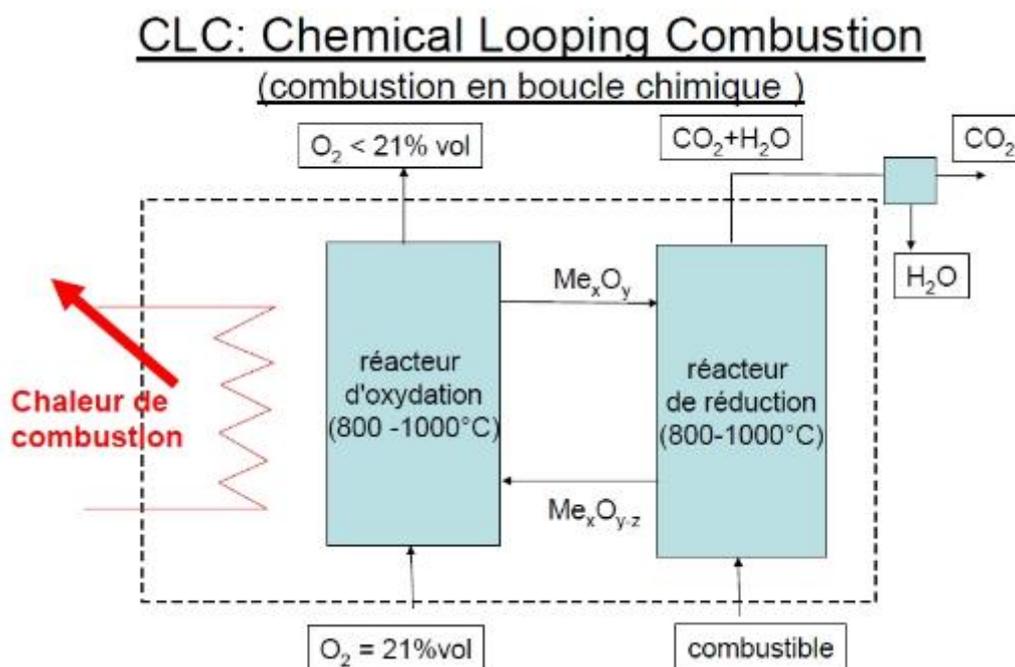


Figure 7 - Diagramme de la combustion en boucle chimique

Source : [http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiep/13/html/contexte\\_industriel.html](http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiep/13/html/contexte_industriel.html)

L'oxycombustion permet d'arriver à des taux de capture de l'ordre de 95 à 99 % sans prendre en compte l'énergie nécessaire à la production d' $O_2$ . Cependant, elle nécessite une adaptation de l'installation industrielle. Cette technologie peut être utilisée sur des centrales électriques, mais semble être particulièrement pertinente pour des applications industrielles de grande envergure comme la production de ciment ou la métallurgie.

À l'heure actuelle, il n'existe pas de projet de captage commercial utilisant l'oxycombustion comme technique de séparation du CO<sub>2</sub> suite à la récente annulation de deux projets en Australie et au Royaume-Uni<sup>17</sup>. Pourtant de nombreux sites industriels utilisent la combustion à l'oxygène pour leurs procédés grâce à l'économie d'énergie que l'absence d'azote permet d'atteindre.

#### 4.2.3. La précombustion

Existant depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, la technologie de capture en précombustion se passe **en amont de la combustion** et nécessite une modification de l'ensemble du procédé. Le combustible est séparé en CO + H<sub>2</sub>O (appelé la gazéification). Ensuite, lors d'une transformation chimique, on obtient un mélange CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> ce qui nous permet, grâce à un solvant, typiquement du méthanol dans ce cas-ci, d'extraire le CO<sub>2</sub>. L'énergie est alors produite grâce au H<sub>2</sub> qui résulte après les transformations précédentes. C'est une technologie déjà utilisée pour la production d'un syngas, un gaz synthétique produit à partir de charbon.

Étant donné la complexité industrielle de cette technologie, elle ne peut s'appliquer qu'à des installations neuves à l'inverse de la postcombustion qui pourrait potentiellement s'appliquer sur n'importe quelle installation existante en retrofit.

Les pré et postcombustions permettent d'atteindre des taux de capture de l'ordre de 80 à 95 %.

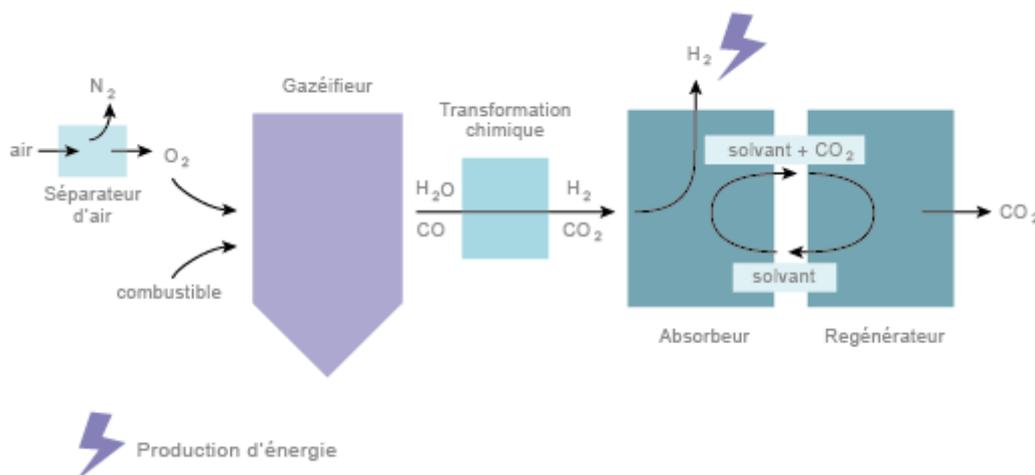


Figure 8 - La capture du CO<sub>2</sub> en précombustion

Source : © Connaissance des Énergies

<sup>17</sup> Les raisons seront développées plus loin dans le document.

#### 4.2.4. Le transport

L'étape du transport s'effectue une fois le CO<sub>2</sub> capté. Au vu des volumes importants, les *pipelines* et les bateaux sont les moyens les plus utilisés. Il existe déjà un large réseau de *pipelines* destiné au CO<sub>2</sub> à travers le monde, et principalement aux États-Unis. Celui-ci sert principalement aux activités de récupération assistée de pétrole (*Enhanced Oil Recovery*, EOR dans la littérature).<sup>18</sup>

Le gaz transporté par *pipeline* est comprimé à une pression de 74 bars ce qui nécessite parfois une recompression intermédiaire afin de garantir un risque minimum. Dans ce cas-ci, le CO<sub>2</sub> se déplace à l'état gazeux. Des opportunités de déplacement à l'état liquide sont actuellement étudiées, mais nécessitent l'isolation des canalisations ce qui entraîne un surcoût important ainsi qu'un délai dans la mise en œuvre.

En ce qui concerne le transport par bateau, il semble être plus approprié pour les longs déplacements lorsque les *pipelines* ne sont pas disponibles ainsi que pour le stockage offshore. Le CO<sub>2</sub> présentant une densité deux fois plus élevée que le méthane, des méthaniers de petite taille conviennent facilement.

Ces deux méthodes semblent toutes deux présenter des avantages tels que la simplicité pour le *pipeline* et l'adaptabilité pour le transport par navire, ainsi que des inconvénients tels que le coût pour le *pipeline* et la complexité pour le transport par bateau. Cependant, étant donné que, dans ces deux cas, les contenants sont sensibles à la corrosion, le CO<sub>2</sub> doit être totalement déshydraté avant d'être transporté pour éviter la présence d'eau. De plus, puisque le CO<sub>2</sub> capté n'est généralement pas totalement pur, des traces de métaux lourds ou autres substances peuvent interférer avec les infrastructures. Les conséquences exactes de ces impuretés restent assez méconnues et font l'objet de recherches intenses.

Il n'y a, à ce jour, qu'assez peu de données sur le bilan carbone total, l'impact environnemental ou l'analyse des risques des deux méthodes. Ceci est dû à un faible retour d'expérience sur le sujet à long terme. Il est important de s'assurer que le bilan carbone reste positif pour que le transport sur de longues distances reste cohérent. Au niveau technique, le transport est l'étape la plus simple des trois, mais elle fait aussi l'objet d'un manque de recherches.

#### 4.2.5. Le stockage

Une fois le CO<sub>2</sub> séparé, liquéfié et transporté, il est prêt à être enfoui. La plupart du temps, le stockage se fait en profondeur dans des **formations rocheuses**. La majorité du CO<sub>2</sub> injecté devrait réagir avec les composants de la formation d'accueil via différents mécanismes de piégeage et ainsi être retenue dans le sol pour des milliers voire des millions d'années. Ceci nécessite des techniques de forage similaires à celles utilisées pour l'extraction du pétrole. D'ailleurs, il arrive que les sites utilisés soient d'anciens puits de pétrole ou de gaz épuisés, principalement pour les techniques d'EOR. Ce type de

---

<sup>18</sup> Voir point 4.2.5.

formation présente une étanchéité intéressante pour le stockage du carbone. Cette étanchéité est assurée par plusieurs couches géologiques imperméables.

Les compagnies pétrolières injectent le CO<sub>2</sub> dans les puits se vidant. Celui-ci vient faire remonter les restes de pétrole en prenant leur place dans la roche. Cette technique permet de s'assurer que le puits est entièrement vide avant de le sceller. Une majorité du CO<sub>2</sub> injecté reste sous terre, la partie remontante est ensuite réinjectée pour continuer l'extraction jusqu'à ce que le gisement soit complètement épuisé. Une quantité relativement importante de CO<sub>2</sub> reste alors dans le sous-sol lorsque le puits est scellé.

D'autres sites potentiels courants sont les aquifères salins, ainsi que les veines de charbon non exploitées. Ces dernières années, ce sont principalement les aquifères qui ont été étudiés parce qu'ils restaient, d'une part, encore peu connus du monde scientifique et, d'autre part, parce qu'ils représentaient le potentiel de stockage le plus important. Après plusieurs tests non concluants, l'intérêt pour les veines de charbon non exploitées, lui, diminue peu à peu.

L'inoffensivité des flux de CO<sub>2</sub> dans les roches cavitaires fait toujours l'objet de recherches. De nombreux projets d'étude estiment que le stockage du CO<sub>2</sub> est sans danger lorsque les sites sont correctement étudiés, sélectionnés et surveillés. Ces résultats ne sont cependant pas une certitude aux vues des nombreuses inconnues que peut représenter la séquestration du carbone. Les efforts combinés des États, des scientifiques et des entreprises ont permis une avancée phénoménale en matière de surveillance et monitoring des puits. Des plans d'action ont aussi été mis en place en cas de fuite en vue de réduire les risques au minimum. Le scellement du puits et le monitoring des entourages font l'objet d'un suivi strict afin de détecter toute fuite éventuelle. Cela traduit l'inquiétude omniprésente des impacts environnementaux et sociétaux du stockage du carbone dans le sol.

Les cavités identifiées présentent un potentiel de stockage allant de plusieurs milliers de tonnes (t) à plusieurs milliers de mégatonnes (Mt) de CO<sub>2</sub>. La capacité de stockage ne représente apparemment pas une limite dans le développement des technologies de CCS. De nombreux progrès ont été faits sur la recherche de cavités potentielles et permettent de l'affirmer.

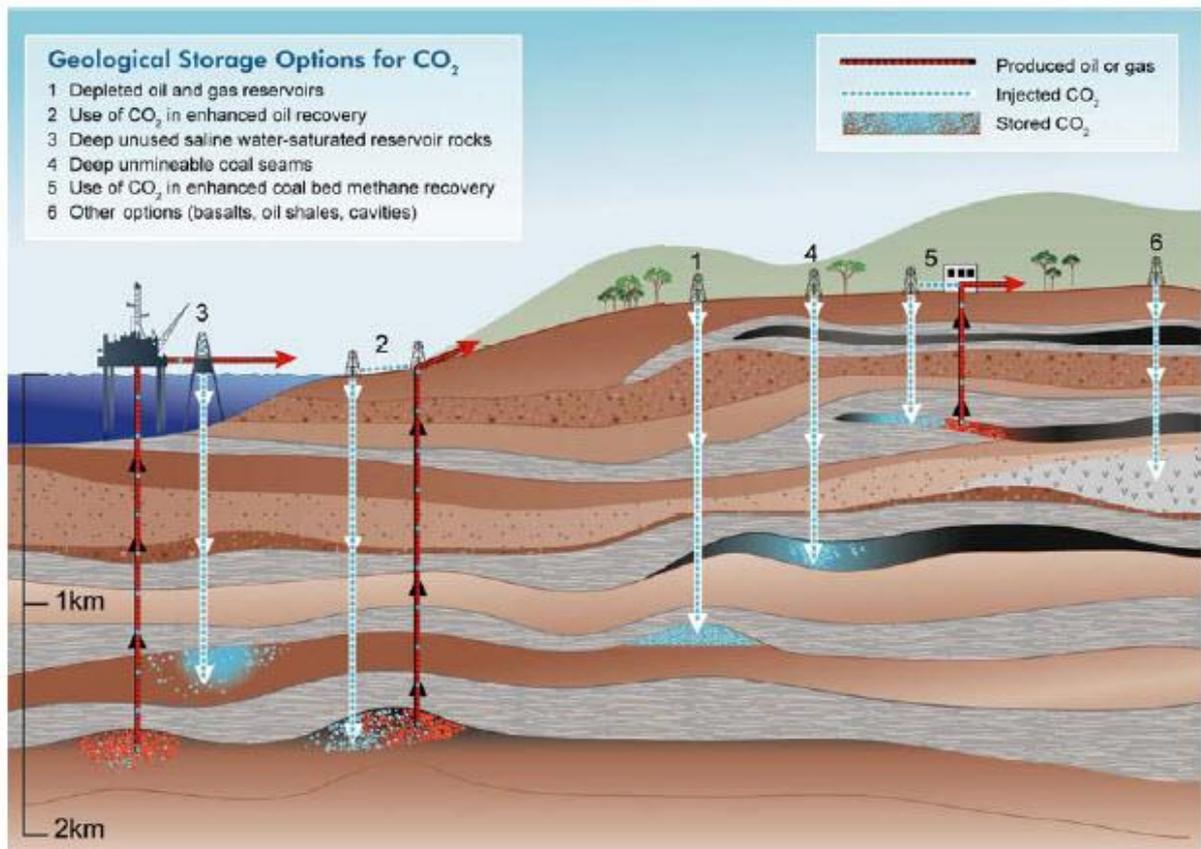


Figure 9 - Aperçu des options de stockage géologique du CO<sub>2</sub>

Source : B. Stuart, 2011, Courtesy of CO2CRC

### 4.3. Aspects énergétiques

La capture du carbone est un procédé complexe et non sans **coût énergétique**. Ce dernier représente la quantité d'énergie supplémentaire nécessaire afin de réaliser le processus. Ainsi deux notions conviennent d'être différenciées : celle du CO<sub>2</sub> capturé et celle du **CO<sub>2</sub> évité**. L'apport d'énergie supplémentaire que nécessite le captage émet lui-même, la plupart du temps, du CO<sub>2</sub>. Le graphique ci-dessous illustre cette différence.

*« L'augmentation de la production de CO<sub>2</sub> résultant de la perte d'efficacité globale des centrales due au supplément d'énergie nécessaire au piégeage, au transport et au stockage et à d'éventuelles déperditions pendant le transport entraîne une hausse de la quantité de CO<sub>2</sub> généré par unité de produit (barre inférieure) par rapport à la centrale de référence (barre supérieure) où l'on ne procède pas au piégeage » (GIEC, 2005).*

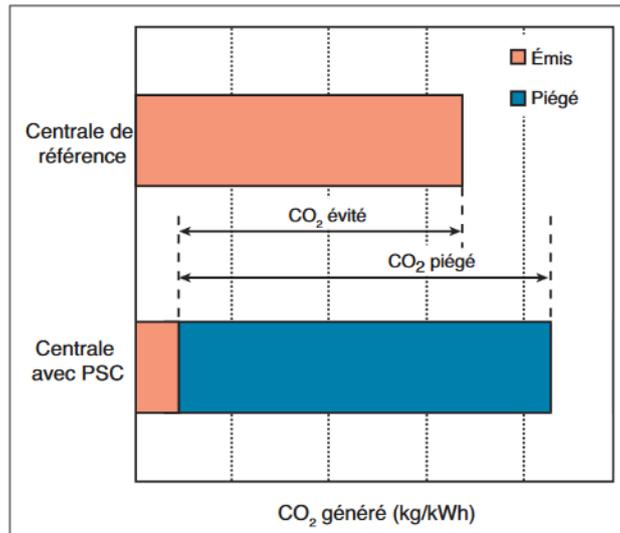


Figure 10 – Différence entre CO<sub>2</sub> piégé et évité émanant de centrales électriques

Source : IPCC, 2005

De nombreux progrès restent attendus afin d'améliorer l'efficacité énergétique ainsi qu'économique. Le coût énergétique représente l'une des priorités de la recherche dans ce domaine. Les universités, entreprises et laboratoires s'unissent afin de développer au plus vite des solutions visant à réaliser une réelle différence. C'est grâce à ce genre de collaboration qu'est né le procédé de CLC.

#### 4.4. Aspects financiers

L'implantation d'unités CCS a un coût élevé. En plus d'une installation imposante nécessitant un **investissement initial élevé**, les coûts opérationnels sont aussi importants. Cela est principalement dû au coût énergétique qui diminue le rendement général de l'installation et au coût de régénération du solvant utilisé pour la postcombustion, de la séparation de l'air pour l'oxycombustion et de la production du gaz de synthèse pour la précombustion. Les procédés actuels ne permettent que peu d'économies d'échelle. Les incitants restent donc faibles à l'augmentation des quantités.

De plus, il est important de prendre en compte le coût du transport et du stockage dans le schéma d'évaluation des coûts totaux, ceux-ci correspondant à la somme des trois étapes : la capture, le transport et le stockage. Les frais de transport incluent la compression et le traitement de manière à ce que le CO<sub>2</sub> soit transportable ainsi que le coût du transport par pipeline ou par bateau vers le site de stockage. Le coût de stockage inclut notamment les coûts de caractérisation géologique, d'injection et ensuite les budgets de surveillance et de monitoring à long terme.

Les différentes études existantes indiquent une variabilité importante du prix. En 2017, une méta-analyse suggère un éventail de coûts allant de 61 à 86 \$/t de CO<sub>2</sub> évité<sup>19</sup> (52 à 74 €) (J. Bergstrom et al., 2017). Une autre étude effectuée par Stanford (Ö. Islegen et al. 2009) suggère que le coût

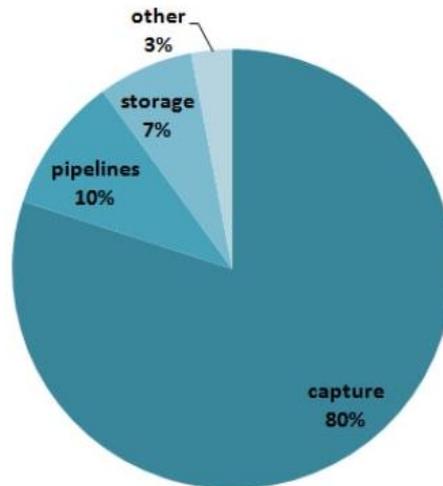
<sup>19</sup> Il s'agit du coût opérationnel, pas du coût d'investissement de l'installation en elle-même.

supplémentaire se situe entre 20 et 70 \$/t de CO<sub>2</sub> (17 à 61 €) en fonction des technologies. Nombreuses sont les études qui donnent encore d'autres gammes de prix. Ce mémoire n'a pas vocation de déterminer le coût exact de chaque tonne, mais il convient d'attirer l'attention du lecteur sur le coût relativement élevé pour une seule tonne de CO<sub>2</sub> évité. À titre de perspective, les permis relatifs à l'*Emission Trading Scheme* européen (EU ETS) concernant une tonne de CO<sub>2</sub> s'échangeaient, le 20 juillet 2018 à 16,5 € (19,3 \$). Nous pouvons donc en déduire que les industriels ne considèreraient, en Europe, l'investissement que dans le cas où les prix remonteraient de manière durable au-dessus du coût d'évitement. Sans revalorisation du CO<sub>2</sub>, les CCS représentent une perte financière. En l'absence d'un marché du carbone performant rendant la participation rentable ou d'une législation contraignante, les CCS ont peu de chances de se répandre.

De plus, il n'est pas évident de déterminer la solution la plus économique entre les différentes technologies disponibles. La plupart des études déterminent un coût pour l'ensemble des technologies CCS confondues et font rarement une distinction entre les méthodes de captage. Lorsqu'elles le font, elles se contredisent souvent. Cependant, il semblerait généralement accepté que l'installation d'une postcombustion sur des centrales au charbon existantes représenterait un surcoût par rapport à la moyenne d'environ 10 à 20 €/t de CO<sub>2</sub>. Il s'agit, par contre, de la seule technologie qui soit adaptée au *retrofit* à l'heure actuelle. Néanmoins, sur le plan de l'investissement financier en capital, aucune des options de capture du carbone ne semble prendre le pas sur les autres.

Grâce à des évolutions technologiques récentes du transport de CO<sub>2</sub>, peu de réductions des coûts sont attendues, à l'inverse de l'étape de capture qui présente le plus gros potentiel de diminution. La capture représente effectivement la part la plus importante dans la structure des coûts des CCS, 80 à 90 % du total lui est attribué. Bien entendu, c'est une filière économique cohérente qu'il faut optimiser de manière intégrée. Une autre méta-analyse tente d'établir une estimation par étape de la filière et détermine que le montant estimé du captage de CO<sub>2</sub> pourrait se situer entre 37 et 44 €/t CO<sub>2</sub> en incluant une compression à 110 bars. Il faut ensuite ajouter un coût de transport moyen entre 1 et 3 €/t de CO<sub>2</sub> pour environ 100 km parcourus. Enfin, pour le stockage du CO<sub>2</sub>, en considérant 10 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> stockées par an, il pourrait s'évaluer à 5 €/t de CO<sub>2</sub> (G. Hughes, 2017). C'est cependant une estimation qui n'est pas sans risque dû à la méconnaissance des contraintes de surveillance et de monitoring.

Figure 11 - Répartition des coûts de projets CCS (Cas de l'Australie)



Source : Global CCS institute, 2012, Potential cost reductions in CCS in the power sector

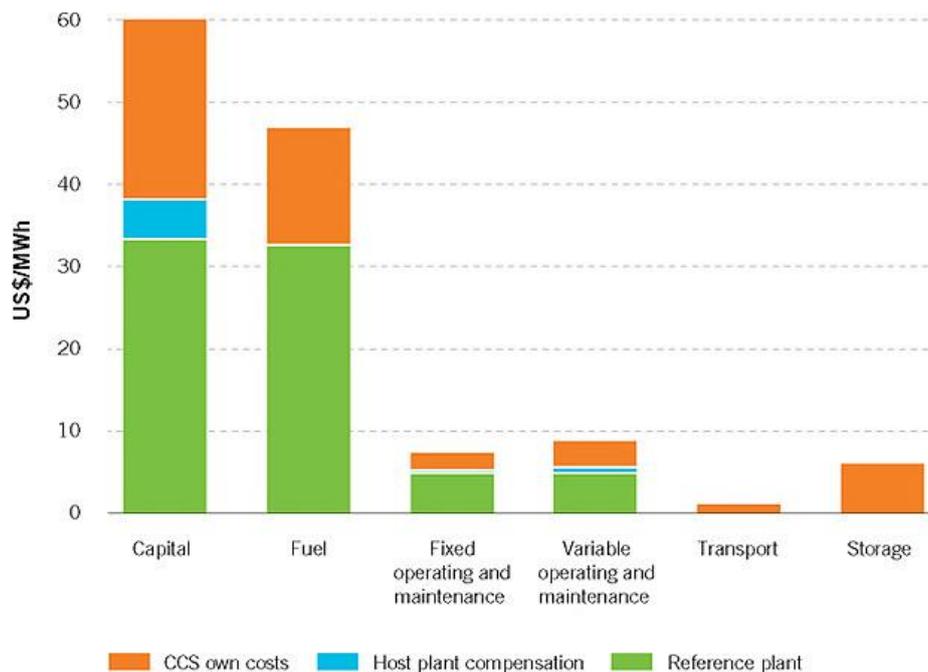


Figure 12 - Impacts financiers de l'ajout de CCS à une centrale électrique

Source : Global CCS Institute, 2012, Potential cost reductions in CCS in the power sector

#### 4.5. Enjeux climatiques

Les CCS ont une place importante dans les **scénarios énergétiques** futurs. De nombreux organismes tels que le GIEC ou l'IEA se sont prêtés à des exercices de modélisation d'émissions afin de prévoir les trajectoires de l'augmentation des températures. Pour réaliser ces projections, des hypothèses sur l'évolution de la démographie et des modes de vie doivent être prises. Il faut estimer et imaginer le futur

des transports, de la consommation d'énergie, de la production des biens et services, de l'efficacité énergétique, etc.

Le GIEC est le premier à y avoir eu recours. Dans ses premiers rapports, il a commencé par construire des scénarios socio-économiques qui étaient ensuite traduits en concentrations de GES pour être enfin incorporés dans les modèles des climatologues. Ces derniers permettaient de traduire le climat futur, les températures, les précipitations, etc., et étaient ensuite réincorporés dans les scénarios socio-économiques afin de prévoir le coût de l'adaptation. Pour le cinquième rapport, en 2014, il a changé d'approche afin d'accélérer le processus d'évaluation : les différentes équipes d'experts, climatologues, hydrologues, agronomes et économistes ont travaillé pour la première fois en parallèle en analysant le futur des changements climatiques. Quatre trajectoires reprenant les émissions, les concentrations de GES, d'O<sub>3</sub> et d'aérosols, l'occupation des sols ont été créées. Appelées Profils Représentatifs d'Évolution de Concentration (RCP, « *Representative Concentration Pathways* »), elles sont étudiées par les différents groupes d'experts pour en déduire les projections climatiques et explorer les possibilités technologiques et socio-économiques qui y sont liées.

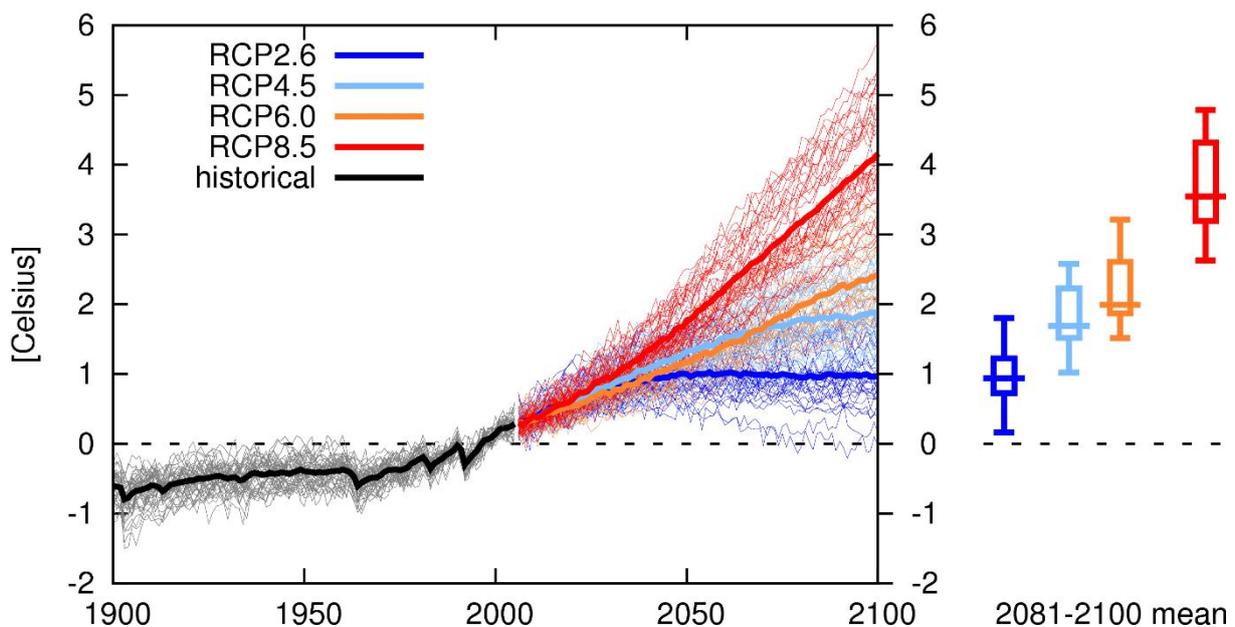


Figure 13 - Augmentation des températures par scénario AR5

Source : IPCC, 2014, AR5

De son côté, l'IEA produit aussi des scénarios. Chaque année, elle sort un rapport appelé le *World Energy Outlook* (WEO) qui reprend 600 à 800 pages de prévisions et d'expertises énergétiques pour les vingt-cinq années à venir. Ce document reprend les scénarios énergétiques et est une référence pour de nombreux domaines comme le secteur énergétique et gouvernemental. Les modélisations représentent les efforts à fournir en termes de réduction des émissions, les engagements politiques nécessaires pour y arriver, etc. Les hypothèses sont construites sur une base moins harmonisée que ceux du GIEC. Pour en citer quelques-uns :

- *New Policies Scenario* : ce cas de figure s'efforce de modéliser la direction vers laquelle les politiques énergétiques et climatiques actuelles et annoncées nous entraînent. Les contributions nationales de l'Accord de Paris y sont aussi comprises ;
- *Scénario 450* : celui-ci considère les mesures à adopter pour que le monde ait 50 % de chance de rester sous la barre des 2 °C en ce qui concerne l'augmentation des températures globales sur le long terme. Toutes ces mesures sont décrites dans le WEO ;
- *Sustainable Development Scenario*: ce dernier traduit les engagements pris par les nations pour arriver aux objectifs de développement durable. Ces engagements concernent les changements climatiques la qualité de l'air, l'accès à l'énergie, etc.<sup>20</sup>

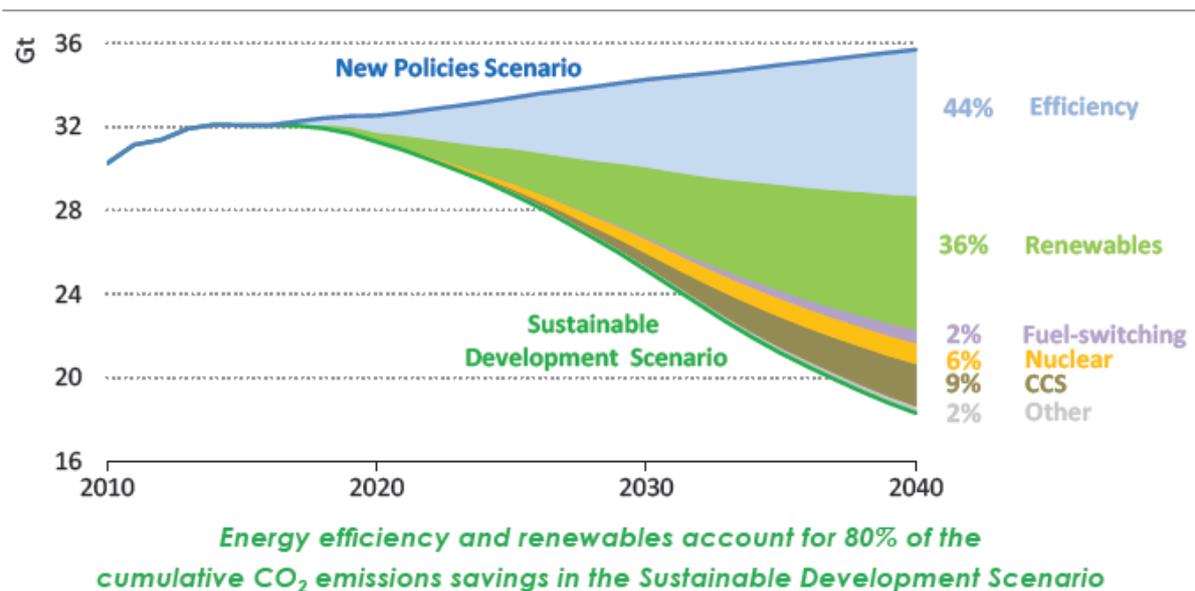


Figure 14 – Scénario de réduction des émissions selon l'IEA

Source : IEA, WEO 2017

Une autre gamme de scénarios produits par l'IEA est appelée *DS*, basée sur une hausse en termes de températures. Le *2DS* propose une vision ambitieuse où la température se limiterait à une augmentation de 2 °C. L'IEA va même plus loin en proposant le *B2DS* qui ambitionne une augmentation maximum de 1,75 °C. Ces deux scénarios convoitent une décarbonisation rapide de la société. Ils visent à pousser jusqu'à leurs limites le potentiel de réduction des technologies connues à ce jour.

<sup>20</sup> D'autres graphiques présentant les différents scénarios se trouvent en annexes, 8.6.

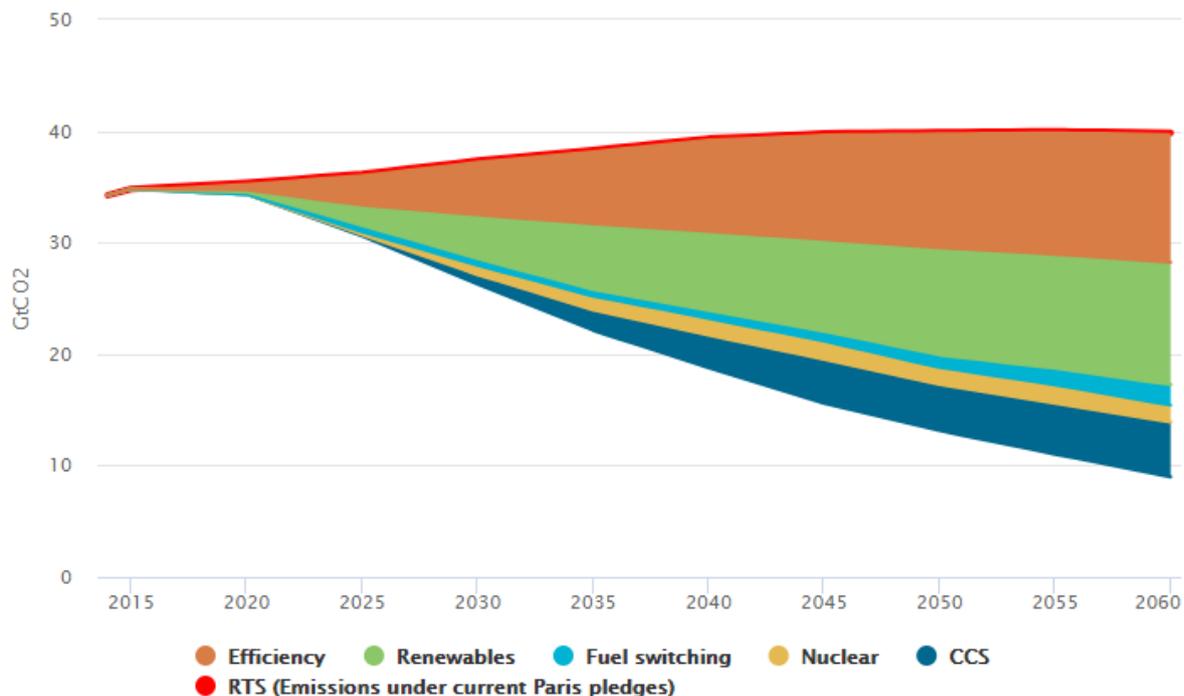


Figure 15 - Contribution par zone technologique à la réduction des émissions dans le scénario 2DS

Source : OCDE & IEA – Energy Technology Perspectives 2017.

Que ce soit les scénarios du GIEC ou ceux de l'IEA, les CCS sont toujours au cœur de la gamme des solutions proposées. Leur rôle peut aller de 9 à 22 % de la réduction des émissions globales envisagée par les scénarios, en fonction des hypothèses, pour les plus ambitieux. Les organismes faisant autorité dans le domaine les estiment inévitables afin de diminuer les coûts de la transition et d'accélérer les réductions d'émissions. Pour certains procédés industriels, elles semblent même être la seule opportunité viable afin de réduire les coûts. Ces technologies sont également envisagées dans le cas d'émissions négatives en utilisant la biomasse. Les végétaux captent le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, normalement en brûlant la biomasse, puis ce dernier est relâché dans l'atmosphère donnant ainsi un bilan nul. Si une unité CCS était ajoutée, le CO<sub>2</sub> retiré des végétaux retournerait directement dans le sol donnant alors un bilan carbone net négatif.

#### 4.6. Impacts environnementaux

Au fur et à mesure que les CCS se développent, le nombre d'études concernant les impacts environnementaux augmente continuellement. Elles jouent un rôle dans la limitation des effets négatifs de la combustion d'énergie et il est important de s'assurer que ses bénéfices environnementaux dépassent ses conséquences. Le CO<sub>2</sub> n'est pas toxique en soit, mais ses effets néfastes sur la santé et l'environnement sont nombreux : effet de serre, acidification lorsqu'il est mélangé à l'eau, asphyxie lorsqu'il est en trop grande concentration, etc.

En ce qui concerne les CCS, le risque principal se situe à l'étape de transport et de stockage. Il s'agit du **risque de fuite**, soit de manière abrupte ou graduelle. Au niveau du captage, les dangers se

concentrent au niveau de l'utilisation de substances parfois dangereuses lors de la séparation du CO<sub>2</sub>. On peut mettre en avant deux dimensions : la probabilité d'occurrence et l'ampleur de l'impact en cas d'occurrence. Cela suscite quelques interrogations :

- Que pourrait-il se passer ?
- Avec quelle probabilité ?
- Quelles en seraient les conséquences ?

Ainsi, de nombreuses d'études se penchent sur les procédés d'injection et de scellement des puits, mais aussi sur le monitoring afin de garantir la détection immédiate de fuite. Dans le cas où une fuite abrupte arriverait, les concentrations pourraient être telles que le CO<sub>2</sub> qui est plus dense que l'air se concentrerait dans certaines zones et serait toxique pour la vie humaine et animale. Au Cameroun, le lac Nyos repose sur une poche magmatique d'où fuit du CO<sub>2</sub>. En 1986, une quantité telle s'est échappée que 1700 personnes et 3500 têtes de bétail furent asphyxiées. Si ce fait est marquant, il n'en reste pas moins rare. Le stockage du CO<sub>2</sub> dans le cadre des CCS doit se faire dans des formations géologiques appropriées, stables, non magmatiques et surveillées.

Dans le cas d'une fuite graduelle, les risques d'asphyxie sont moins importants, mais les grandes quantités de CO<sub>2</sub> ainsi relâchées dans l'atmosphère annuleraient tous les avantages des CCS. Cela pourrait arriver dans le cas où le site d'injection n'est pas bien sélectionné ou s'il n'a pas été correctement préparé. En effet, les risques de fuites sont accrus lorsque la formation géologique est en contact avec de l'eau. Le CO<sub>2</sub> rend l'eau plus acide, elle devient donc corrosive pour les roches qui s'affaiblissent et auraient plus tendance à relâcher le CO<sub>2</sub> qu'elles contiennent.

Il n'y a que très peu de retours d'expérience sur le stockage du carbone à long terme. Le CO<sub>2</sub> stocké devrait l'être pour plusieurs milliers d'années, mais nous ne disposons malheureusement que d'une trentaine d'années d'expérience (*Australia House of Representatives Standing Committee on Science and Innovation*, 2007). Les risques liés à une fuite de CO<sub>2</sub> sont néanmoins connus des autorités et des industriels. Les mines et la fermentation sont notamment deux des secteurs traitant avec le CO<sub>2</sub>. Même si les CCS sont nouveaux, les dangers afférents le sont moins, à l'inverse des OGM et des nanotechnologies par exemple.

Les études montrent que, jusqu'à présent, le CO<sub>2</sub> stocké ne devrait pas représenter de danger important. C'est ce degré d'incertitude que soulignent de nombreuses ONG telles que Greenpeace ou les Amis de la Terre. Celles-ci mettent en avant un risque de dérangement sismique que la pression induite par l'injection du CO<sub>2</sub> dans des formations géologiques pourrait causer. Il n'y a aucune preuve permettant d'affirmer avec certitude qu'une formation rocheuse contenant du CO<sub>2</sub> injecté restera stable et hermétique pendant les quelques milliers d'années durant lesquelles elle doit servir de réservoir. Pourtant le GIEC soutient que les risques liés au stockage restent faibles et sont similaires à ceux connus par l'industrie du pétrole et du gaz. Il en va de même pour les ceux liés au transport. Cependant à l'inverse du GN qui est amené par pipeline, le CO<sub>2</sub> n'est pas inflammable et ne présente donc qu'un faible risque d'explosion.

Il existe aussi des risques locaux, en fonction de l'emplacement des cavités de stockage. Un site de ce style, au même titre qu'une exploitation pétrolière, a un effet sur son environnement : perturbation de la faune et de la flore marine, dans le cas de site offshore par exemple.

De nombreuses analyses de cycle de vie (*Life Cycle Assessment*, LCA) du processus ont été développées afin d'estimer l'impact de l'entièreté du procédé de capture, transport et stockage du CO<sub>2</sub> lié à la combustion. Comme mentionné précédemment, l'investissement relatif aux CCS est tel qu'il est impératif de s'assurer du bilan positif de la technologie sur le long terme. Les limitations liées aux choix méthodologiques des LCA empêchent de formuler une affirmation universelle. Cependant, les auteurs de ces études peuvent tout de même quantifier des ordres de grandeur permettant de mieux comprendre les performances environnementales des CCS. Les LCA comparent les impacts de centrales électriques de référence avec ces mêmes centrales, équipées de CCS. Dû aux différences de méthodologie, il est parfois difficile de comparer les études. Cependant, elles peuvent l'être avec un effort d'harmonisation<sup>21</sup>. La postcombustion est généralement la plus étudiée, ce procédé étant le plus mature.

L'utilisation des CCS permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> des centrales aux énergies fossiles de 47 % à 97 % en fonction de la technologie utilisée. Cette diminution concerne l'entièreté du cycle de vie de l'unité et prend ainsi en compte l'énergie grise incorporée dans les unités de CCS, mais aussi celle utilisée pour la régénération des solvants et autres entrants essentiels à la capture. Ainsi, l'énergie nécessaire au fonctionnement va varier en fonction de plusieurs facteurs dont notamment le combustible employé, la technologie utilisée, la distance de transport et la difficulté d'injection. Par ailleurs, l'utilisation des CCS entraîne une transformation du profil énergétique de la centrale. Dans le cas d'une centrale traditionnelle, la majorité des impacts environnementaux proviennent des émissions directes dues à la combustion de carburant. Pour une centrale équipée de CCS, la majorité des impacts proviennent des émissions indirectes dues à la régénération des solvants ou à la séparation de l'air. Le poids de l'énergie incorporée est aussi proportionnellement plus important dû aux émissions totales plus faibles.

#### 4.7. Aspects légaux

L'agence Internationale de l'Énergie estime que les CCS doivent se développer au plus vite afin d'arriver aux résultats escomptés, à savoir 7,8 Gt de CO<sub>2</sub> capturé par an d'ici 2050. Le **cadre juridique** à mettre en place pour encourager le déploiement d'unités pilotes et s'assurer que cela se réalise dans le contexte le plus sécurisé doit être spécifique, complet, intégré, efficient et clair. Il doit diminuer les incertitudes, promouvoir la transparence et encourager la participation du public.

En 2009, l'IEA a lancé un appel aux différents pays pour qu'ils lancent une initiative de légifération ambitieuse des CCS, une technologie qu'elle estime solide, mais qui nécessite un encadrement soutenu. Le but était d'abaisser les barrières et lacunes juridiques susceptibles de causer des

---

<sup>21</sup> Qui fait l'objet d'études (M. Corsten et al. 2013).

incertitudes et ralentir leur diffusion. En effet, il n'existait bien souvent pas de règles spécifiques aux CCS et celles-ci étaient par défaut soumises à l'autorité de règlements communs à d'autres industries. La technologie requiert pourtant que la question des responsabilités et opportunités du stockage soit efficacement définie entre gouvernements, propriétaires du sol et « injecteurs ».

Aujourd'hui, bien que de nombreux pays aient commencé à organiser légalement ce type d'activités, il est souvent difficile d'avoir un retour d'expérience suffisant permettant d'évaluer l'efficacité des lois en raison du nombre limité de projets en opération. L'*International Organization for Standardization* (ISO) prépare des standards pour la capture et le stockage du carbone (ISO/TC265, 2011), pouvant ainsi servir de référence internationale.

Deux types de législation se distinguent. Il existe, d'une part, les règles régissant les activités et l'organisation des CCS et, d'autre part, des législations destinées à encourager le déploiement de la technologie.

L'IEA a établi en 2010 une liste de 29 aspects relatifs aux CCS qui devraient être organisés légalement par les gouvernements locaux<sup>22</sup>. Parmi ceux-ci, nous citons notamment la classification des formations géologiques d'injection, les problèmes liés aux activités post injection, le monitoring des fuites possibles, les permis d'exploitation pour les sites de stockage, l'utilisation des matériaux de séparation lors de l'étape de captage ou encore la transparence lors de la phase opérationnelle.

L'aspect juridique du stockage doit être primordial. Or, la réponse diffère considérablement d'un pays à l'autre. Le sol peut être vu uni ou séparé entre sol et sous-sol, en fonction de la profondeur. Le sous-sol peut appartenir au même propriétaire que la surface, privé ou public, ou rester aux mains de l'état, province ou juridiction. Le besoin de permis d'exploitation peut aussi être sensiblement différent et devenir la cause d'importantes difficultés. Il arrive, par exemple, qu'il faille une autorisation pour effectuer de la prospection de formation géologique susceptible d'accueillir le CO<sub>2</sub>. Cependant, l'obtention de ce type de permis peut requérir une connaissance préalable des caractéristiques du sol ce qui limite ainsi l'opportunité des CCS sur ces territoires.

Il existe trois catégories de législations qui visent à encourager et inciter les CCS : les régulations d'ordre climatique qui soutiennent les CCS par leur vaste champ d'application en construisant un cadre ambitieux pour la lutte contre les CC, les législations spécifiquement dirigées vers les CCS qui organisent l'entièreté de la chaîne de valeur et finalement, les législations destinées à une séquestration optimale et sûre qui organisent la répartition des responsabilités et qui contribuent à la vision long terme. Chacune de ces législations intervient à un moment spécifique de l'évolution de la maturité de la technologie.

---

<sup>22</sup> Voir Annexe 8.7 pour la liste complète.

## 4.8. Acteurs principaux

Les interactions de nombreux acteurs s'entremêlent quand il s'agit du développement d'innovations telles que les CCS. En accord avec la théorie de l'acteur réseau, l'importance de **l'imbrication des différents intervenants** joue un rôle primordial dans la diffusion de la technologie. Comme explicité dans la partie théorique, l'ANT considère un nombre incalculable d'actants pour le développement d'une technologie. Dans l'application que ce mémoire présente, nous avons fait le choix de réduire la liste ci-après aux actants principaux, tout en concevant que cette distinction est contraire à la théorie et en gardant à l'esprit la multitude d'actants supplémentaires.

L'artéfact CCS s'inscrit dans un vaste **réseau** qui repose sur des acteurs humains et non humains : les chercheurs, ingénieurs et techniciens ont conçu une technologie que les laboratoires et les universités se sont efforcés de soutenir. Des organisations telles que le GIEC, IEA et bien d'autres ont démontré que les scénarios permettant de rester sous la barre de 2 °C d'augmentation incluaient des CCS. Grâce à leur soutien, ces technologies se sont fait peu à peu connaître auprès de la population. Les citoyens, quant à eux, ont le pouvoir de demander ou de s'opposer à l'établissement d'une unité. Celles-ci sont produites par certaines entreprises en partenariat avec les distributeurs d'énergie. Les gouvernements ont joué un rôle de support en produisant un cadre légal favorisant, ou non, le déploiement de la technologie. Ce sont des instances étatiques, et donc par extension les gouvernements, qui ont octroyé des financements publics permettant d'améliorer le *business case* des CCS. Une multitude d'acteurs secondaires ont également eu un rôle capital dans l'évolution de cette technologie. Nous citerons notamment les banques et organismes de financements dont proviennent une part importante des investissements nécessaires au lancement d'une unité, le marché du carbone dont le prix influence et influencera grandement l'attitude de l'industrie face à la technologie et les ONG environnementales qui se sont positionnées en faveur ou non de la technologie.

Le déploiement de la technologie s'est donc fait au sein d'un vaste réseau d'acteurs interagissant entre eux. Les paragraphes qui suivent vont tâcher d'en présenter les principaux.

### 4.8.1. La recherche

Depuis les années 70, la recherche, menée par les scientifiques, ingénieurs, laboratoires et universités, est très active. Même si les premiers projets apparentés aux CCS, soit l'EOR, commencent très vite à l'échelle commerciale, ce n'est pas le cas pour les CCS de manière générale. C'est au MIT que l'on doit le premier projet de recherche en capture, utilisation et séquestration du carbone, en 1989. Le programme est devenu un leader dans son domaine en analysant les perspectives au niveau technique, politique et économique. Il a cessé ses activités en 2016.

La recherche s'organise selon plusieurs modes. Certains programmes sont menés par les universités elles-mêmes, d'autres sont organisés par des consortiums, ou encore par des agences gouvernementales. De nombreux consortiums se forment afin de regrouper entre eux les académiciens, les laboratoires et les enthousiastes des technologies. Le *UK Carbon Capture and Storage Research*

Centre est l'un d'entre eux. Il est supporté par plusieurs structures telles que l'*Engineering and Physical Sciences Research Council* et le *Research Councils UK Energy Programme*. Le but du consortium est de rendre les CCS rentables d'ici 2020.

Aux USA, le département de l'énergie a développé un réseau appelé le *Regional Carbon Sequestration Partnerships*. Ce réseau reprend des agences d'État, universités, laboratoires, entreprises privées et organisations environnementales américaines et canadiennes. Celui-ci a été établi afin de soutenir la recherche et déterminer dans les plus brefs délais la meilleure approche face à la capture et la séquestration du carbone, et cela afin de limiter les changements climatiques. Les différentes missions du réseau sont la détermination de la technologie la plus appropriée, les politiques à mettre en place et les infrastructures pouvant les accueillir (J. Litynski et al. 2009).

Dans beaucoup d'autres pays, les programmes se multiplient afin d'accélérer le mouvement. Étant donné la faible maturité de la technologie, la recherche est cruciale dans le but d'améliorer la rentabilité, connaître et gérer les risques et enfin optimiser les performances des CCS.

#### 4.8.2. *L'Agence Internationale de l'Énergie*

Créée en 1974 à la suite du premier choc pétrolier, l'Agence internationale de l'Énergie est une agence intergouvernementale et autonome. Elle a comme but premier de faciliter la coordination des politiques énergétiques des pays de l'OCDE<sup>23</sup>. Elle aspire à voir converger les politiques selon trois axes : la sécurité énergétique, le développement économique et la protection de l'environnement. Elle étudie de nombreux aspects de l'énergie et de son approvisionnement, ainsi que ses impacts environnementaux. Elle remplit un rôle de conseil auprès de ses membres en publiant des rapports annuels et ad hoc. Ces rapports sont considérés comme des références dans le secteur. Il s'agit d'informations sur les marchés, sur l'état de développement de certaines technologies, de statistiques, etc. Le rapport annuel le plus important est le *World Energy Outlook* qui se positionne comme un état des lieux de la situation énergétique mondiale et des perspectives d'avenir, qui a été mentionné au point 4.5.

L'IEA considère les CCS comme cruciales dans les efforts à fournir pour limiter l'augmentation des températures. Elle estime que dans ses scénarios, si les CCS ne devaient pas intervenir, le coût des autres technologies deviendrait exorbitant et presque prohibitif. Grâce au développement de l'entièreté des technologies bas carbone, l'humanité garde une chance d'atteindre le scénario 2DS. Par contre ceci nécessite une ambition forte et l'installation massive d'unités afin de commencer à capter dès aujourd'hui les 7,8 Gigatonnes (Gt) de CO<sub>2</sub> nécessaires (IEA, 2012).

L'Agence Internationale de l'Énergie souligne que « *si nous voulons atteindre l'objectif mondial de 2 °C, notre consommation, d'ici à 2050, ne devra pas représenter plus d'un tiers des réserves prouvées de combustibles fossiles, à moins d'un déploiement à grande échelle de la technologie de captage et de stockage du carbone. (...) Le rythme de déploiement demeure malheureusement très incertain* » (WEO,

---

<sup>23</sup> À l'exception du Chili, de l'Islande, d'Israël, de la Lettonie et de la Slovaquie.

2012). Ainsi, l'agence a déjà revu à la baisse le potentiel de contribution des CCS passant d'une participation de 19 % aux efforts totaux en 2011 à 9 % actuellement.

L'AIE a une position favorable aux CCS. Au travers de nombreuses publications et profitant de son autorité dans le secteur de l'énergie, elle semble avoir œuvré à transmettre les informations vers les professionnels et gouvernements.

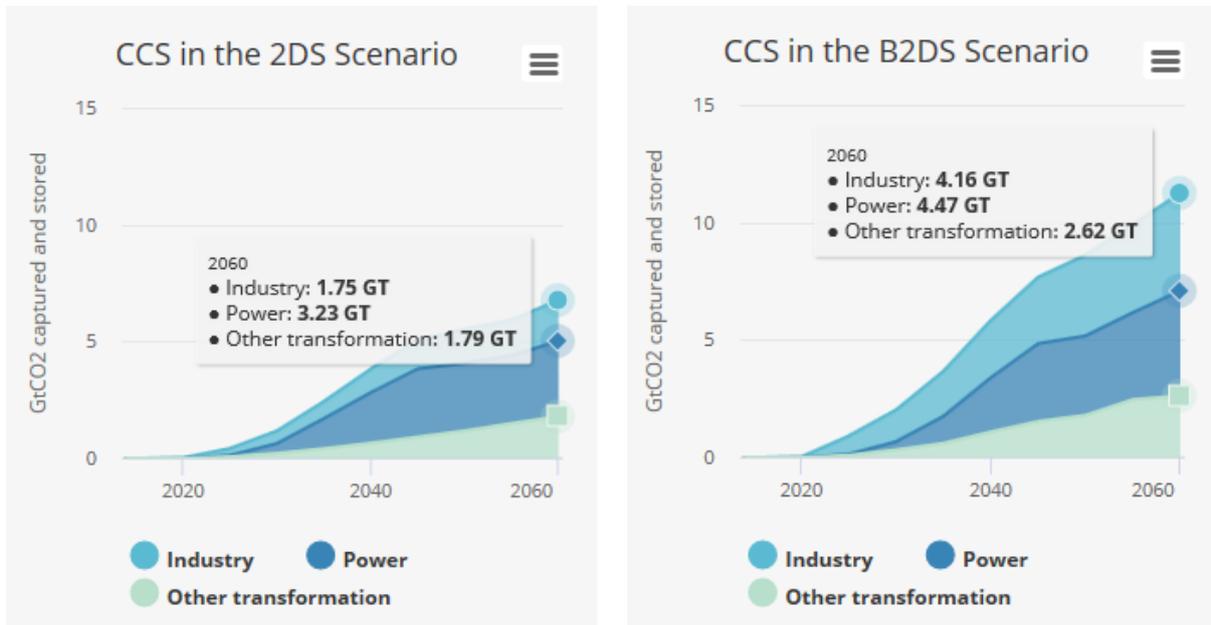


Figure 16 - Captage et stockage de CO<sub>2</sub> en Gt en scénario 2DS et B2DS

Source : OCDE & IEA – Energy Technology Perspectives 2017

#### 4.8.3. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

« Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade » (GIEC, website). Le groupe reprend des scientifiques du monde entier (pays membres de l'ONU). Il a gagné en 2007, avec Al Gore, le prix Nobel de la paix pour ses travaux sur les CC. Depuis sa création, le GIEC produit des rapports réguliers sur l'état d'avancement des connaissances sur les CC ainsi que des rapports spéciaux sur des thèmes précis comme l'aviation, les incidences de l'évolution du climat dans les régions, les changements d'affectation et la foresterie, le piégeage et stockage du dioxyde de carbone, etc.

Le rapport sur les CCS en tant qu'opportunité d'atténuation des CC est sorti en 2005. Il fait le point de la littérature scientifique parue avant cette date. Mandaté par la 7<sup>e</sup> Conférence des parties (COP) ce document est incontournable. Le GIEC n'y émet pas d'opinion précise, mais relate les faits. Il a le devoir d'informer afin que les autorités disposent des connaissances suffisantes pour agir.

Le dernier rapport général datant de 2014 reconnaît que dans l'éventail de solutions destinées à combattre les CC, les CCS sont indispensables. Cependant, il souligne également que ceux-ci doivent aller de pair avec des changements majeurs au niveau des politiques et de la technologie pour parvenir à maintenir l'augmentation des températures sous la limite des 2 °C. Le groupe d'experts se montre, néanmoins, prudent au niveau de l'utilisation des CCS. En effet, si l'utilisation combinée de la biomasse a un bilan positif, l'utilisation de l'EOR lui a l'effet inverse puisqu'il contribue à mettre plus de carburant fossile sur le marché.

#### *4.8.4. La population*

Les citoyens jouent un rôle important pour le développement des CCS, car ils ont le pouvoir d'accepter ou de rejeter la technologie. Et pour que la technologie se développe à grande échelle, en plus de l'avancée technologique, la collaboration de la population est indispensable. Cette dernière représente la construction sociale la plus simple et évidente telle que le rappelle l'ANT. Elle peut faire pression selon son choix ainsi qu'occuper différents rôles face aux CCS. Autrement dit, elle peut être partie prenante à un projet et être en interaction directe avec la technologie ou agir comme faisant partie du contexte sociopolitique. Les citoyens représentent l'opinion publique qui poussera les décideurs à agir face aux CCS dans la direction de leur choix.

Si la phase de capture est la plus difficile financièrement parlant, la phase de stockage est, quant à elle, plus compliquée en ce qui concerne **l'acceptation sociale**. Celle-ci dépend de leur perception du risque et des bénéfices, qui à leur tour, dépendent de nombreux facteurs tels que l'âge, le sexe, l'éducation, l'affinité à la technologie, le lieu de domicile, la confiance portée aux autorités et à l'industrie, la sensibilité aux changements climatiques, mais aussi la culture nationale/géographique (F. Karimia et al.). La difficulté dans le cadre des CCS est que la technologie reste peu mature et son déploiement limité. La population dispose donc d'assez peu de points de référence, ne la connaît guère et ne la comprend généralement pratiquement pas non plus. Le manque de connaissance est l'une des raisons majeures de l'opinion défavorable.

La perception du risque de fuite peut être décisive dans le développement d'un site de stockage, et donc, pour le déploiement dans la technologie entière. L'acceptation des citoyens est une des préoccupations majeures de l'industrie et du décideur politique. Selon le droit international, tout citoyen a le droit d'accéder aux informations traitant de l'environnement et de participer au processus décisionnel<sup>24</sup>. Ainsi, une connaissance approfondie des problèmes de changements climatiques a tendance à augmenter la perception des bénéfices des CCS, mais n'a pas d'effet sur la perception des risques.

La perception du risque est différente pour chacun. Si les sociologues peuvent trouver que certaines régions ont une affinité plus prononcée pour le risque, il est difficile d'affirmer une telle conclusion. Cependant, il est possible de constater certaines caractéristiques révélatrices d'une propension au risque. Par exemple, les personnes s'affirmant en faveur du nucléaire le sont généralement aussi pour

---

<sup>24</sup> Principe 10 de la Convention de Rio, Convention d'Aarhus.

les CCS. Celles-ci estiment que les bénéfices surpassent les risques qui apparaissent comme peu probables (K. Pietzner et al., 2011). Les statistiques montrent que les femmes, les personnes âgées et les personnes moins éduquées, se positionnent généralement comme étant moins favorables aux CCS.

L'effet *Not-In-My-Backyard* (NIMBY) se traduit par une opinion positive des CCS de manière générale, mais une opposition soutenue à ce qu'un site de stockage ne s'établisse à proximité du lieu de vie. Cette contradiction montre donc que le citoyen peut se positionner de manière différente s'il se considère comme l'**opinion publique** ou la **partie prenante**. Cette opinion favorable ou défavorable envers les CCS a été relativement peu étudiée de manière scientifique. Les études existantes sont principalement empiriques et font appel à des questionnaires. Elles ont été menées dans de nombreux pays, suivant des modes opératoires différents. La majorité de celles-ci datent du début des années 2000, en lien avec la période de haute considération des CCS.

Le milieu socioculturel semble être l'un des facteurs principaux liés à la perception du risque. Les personnes en provenance d'un milieu plus aisé ou disposant d'un niveau d'éducation plus élevé se montrent plus favorables à la technologie. Le citoyen moyen, étant peu informé à propos des CCS, se forge une opinion basée sur celui des porte-paroles, comme le présente la théorie de l'acteur réseau. S'il entend parler de cette technologie par une entreprise qu'il juge comme négative, son opinion aura tendance à être négative également. S'il s'agit d'une ONG environnementale qu'il juge comme positive, mais que celle-ci véhicule un message négatif à propos des CCS, son opinion sera sans doute tout aussi négative (M. Ha Duong, 2009). De manière générale, le citoyen aura tendance à se ranger du côté de l'acteur avec qui il partage ses valeurs.

En France, les enquêtes montrent que les habitants sont généralement sensibles « *aux problèmes de préservation de l'environnement et de lutte contre le réchauffement, mais leurs connaissances paraissent lacunaires : le besoin d'informations est réel, notamment sur les mesures concrètes envisagées* » (M. Ha Duong, 2009). Les auteurs de l'étude insistent sur le manque de connaissance de la technologie qui implique une nécessité d'informer les citoyens sur le procédé, mais aussi ses risques et bénéfices. Si les Français sont conscients de la nécessité d'agir en faveur du climat, ils se montrent tout de même inquiets face aux risques et incertitudes relatifs aux CCS.

Au Canada, les connaissances de la technologie parmi les citoyens se sont améliorées entre 2005 et 2015 suite aux projets en cours dans le pays. Ces derniers ont permis un retour d'expérience positif et ont permis aux porte-paroles de démontrer le succès possible des CCS. La perception des problèmes climatiques y a d'ailleurs drastiquement augmenté et la problématique y est désormais perçue comme une priorité nationale. Le Canada est un pays qui diffère sensiblement de la France sur bien des points. La densité de population y est moindre et l'effet NIMBY y est nettement moins prononcé. En 2005, plus de la moitié des sondés répondaient qu'ils incluraient les CCS dans une stratégie de lutte contre les changements climatiques (J. Sharp, 2008). En 2007, ils étaient 62 % à y être favorables et seulement 16 % à y être opposés<sup>25</sup>.

---

<sup>25</sup> Les autres n'émettent pas de préférence.

Les États-Unis présentent une attitude bien différente. La perception du risque est bien en dessous de celle en Europe et la population refuse la présence de site d'injection onshore. Les Américains semblent être plus préoccupés par le bien-être de leur communauté que par les risques qu'elle encoure à proprement parler. Ils sont prêts à l'accepter uniquement si la présence de CCS s'accompagne d'un programme de compensation à l'égard de la population. L'étude de J. Bradbury et al. (2009) montre que la perception des CCS peut être fortement liée à la perception du gouvernement et des autorités publiques ou de l'industrie privée. En cas de méfiance reconnue envers le gouvernement, les personnes interrogées montreront aussi une aversion face aux CCS. Cette tendance n'a, cependant, pas été spécifiquement mentionnée dans d'autres études prenant une population européenne comme échantillon.

#### 4.8.5. Les organismes de financement

L'investissement que représentent les CCS rend le financement difficile. Les projets nécessitent un apport financier important afin de limiter le risque dans le chef de l'entreprise et de les rendre plus rentables. Il existe de nombreux fonds publics destinés à participer au financement de projets pilotes ambitieux afin de généraliser la technologie et de profiter du retour d'expérience pour améliorer les connaissances et la rentabilité.

En Europe, il existe deux programmes : *EU Energy Program for Recovery* (EEPR) et *NER300*. Tous deux sont sous la tutelle de la Commission européenne. Ils ne permettent cependant pas de couvrir l'entièreté des coûts d'un tel projet. Les financements privés restent nécessaires en complément.

Le *NER300* est géré par plusieurs organismes, dont la banque européenne d'investissements et les États membres (EM). Il a l'ambition de financer les technologies innovantes bas carbone par la participation à des projets de grande envergure. Le fond se veut être un catalyseur pour les CCS et les ER au sein de l'Union européenne (UE). Instauré en 2008, le programme devait trouver ses financements en vendant des quotas d'émissions sur le marché européen. En tablant sur un prix de 30 €/t de CO<sub>2</sub>, le montant total des aides à redistribuer devait se situer aux alentours de neuf milliards d'EUR, ce qui en a le plus gros fond d'accompagnement des CCS au monde<sup>26</sup>.

L'EEPR était un fonds d'un milliard d'EUR destiné au financement de projets pilotes dans certains EM. En 2009, six projets ont été choisis pour bénéficier d'une part du budget. Cinq d'entre eux ont été annulés, l'unique restant est une unité de précombustion au Royaume-Uni.

D'autres programmes de financement peuvent contribuer au financement de projets de CCS. L'un d'entre eux est le *Seventh Framework Programme*. Avec ses 50 milliards d'EUR, il est destiné à supporter la recherche et le développement en technologie. Parmi les lauréats figure un projet de recherche sur les CCS.

---

<sup>26</sup> Plus d'informations au point 5.3 et 6.7.

Certains pays ont érigé leur propre fonds comme le Royaume-Uni avec un budget d'un milliard de GBP. Néanmoins, six mois avant l'annonce du projet gagnant, le gouvernement anglais a malheureusement clôturé le programme sans préavis causant l'annulation des deux projets en lice pour l'obtention du financement, dont l'unique projet qui devait bénéficier d'une part de l'EEPR.

Aux États-Unis, l'administration Obama sous l'*American Recovery and Reinvestment Act* a mobilisé 3,4 milliards d'USD pour les CCS. L'objectif était de promouvoir le développement d'unités CCS de grande envergure. Les projets retenus concernent l'EOR et permettent d'augmenter la production de pétrole de dix millions de barils par an en séquestrant un total de 6,5 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Toujours aux USA, le *Clean Coal Power Initiative* vise à protéger l'environnement de la source d'énergie la plus polluante, mais aussi de moderniser les centrales au charbon en opération dans le pays. Il s'agit d'un partenariat public-privé voulant financer trois projets pour un total de 3,2 milliards d'USD.

Les quelques exemples repris ci-dessus ne reprennent pas la totalité des programmes de financements. Néanmoins, ils illustrent bien la tendance récente de promesses suivies d'annulations et confirment l'intérêt de cette étude. Les projections originelles étaient pourtant positives. Elles envisageaient un futur meilleur à raison de financements, mais ne prévoyaient pas la quinzaine d'annulations suite à une clôture de programmes qui avaient le pouvoir de faire avancer la technologie.

Certaines banques se sont aussi distinguées par leur intérêt pour les CCS, c'est le cas de la banque de Zurich. Le *Zurich's Climate Change Advisory Council* a identifié la technologie comme une priorité pour l'entreprise. En plus de la création de deux assurances spécifiques, le *Carbon Capture and Sequestration Liability Insurance* et la *Geological Sequestration Financial Assurance*, le conseil a fourni des taux avantageux pour soutenir la recherche démontrant ainsi un soutien important.

#### 4.8.6. *Le paysage industriel*

La chaîne de valeurs des CCS étant complexe et commercialement peu avancée, le marché continue de présenter une faible densité. En 2016, il était estimé à 4,2 milliards d'USD. Avec une croissance prévue de 13,6 % par an, celui-ci devrait atteindre les 8 milliards en 2021 (Grand View Research, 2015). Cette croissance est soutenue par l'augmentation des **besoins énergétiques** et la conscience de l'enjeu climatique. Les deux tiers de ce marché devraient concerner les activités d'EOR, avec la forte dépendance au pétrole et les gisements qui se vident. Cependant, c'est dans l'industrie que devrait se manifester la croissance la plus forte. Cette croissance devrait être d'autant plus importante que les marchés du carbone à travers le monde deviennent plus efficaces.

Les États-Unis détiennent une place dominante sur le marché des CCS, avec un taux d'occupation de l'ordre de 60 %. Les plus grands acteurs sont Shell, AkerSolutions, Statoil, Linde Engineering, Mitsubishi Heavy Industries, Carbon Clean Solutions. Il est important de faire une distinction entre les fabricants et les opérateurs. Shell est l'un des plus grands opérateurs au monde avec plusieurs projets pilotes en fonctionnement dans sa flotte. Statoil était le premier à développer la technologie à grande échelle avec

le projet Sleipner en Norvège. Carbon Clean Solutions est, quant à lui, un fabricant. Il propose des solutions que l'on pourrait presque qualifier de « clés sur porte » (carboncleansolutions, Website).

Les petites entreprises sont minoritaires dans le secteur, les barrières à l'entrée étant très importantes, Carbon Engineering, Climeworks et CO<sub>2</sub> Solution ont, cependant, réussi à se faire une place soit en étant les leaders d'une partie de la chaîne de valeur soit en développant une technique de séparation qui leur est propre.

Les différentes technologies qui sont mentionnées dans ce mémoire sont à différents stades de maturité. Ces derniers sont repris sur le graphique ci-dessous. Nous y remarquons qu'elles se caractérisent par un besoin plus ou moins élevé en capital. Cela représente également un risque dans leur potentiel de développement. Ainsi, une courbe se forme liant la maturité au besoin en capital et le risque joint à ce capital. Il existe une « vallée de la mort », un moment critique dans le développement d'une innovation, marquant la transition de l'état de projet d'étude et de phase test vers un déploiement commercial. Lors de cette étape, la technologie nécessite beaucoup d'investissements. Ceux-ci servent à continuer la recherche et à lancer des projets pilotes qui feront avancer la connaissance et baisser les coûts pour les prochaines unités. C'est précisément cette transition que les politiques devraient soutenir et qui s'avère ne pas être un succès. Une technologie telle que les CCS coûte cher à l'investissement, mais aussi à l'utilisation. De plus, elle n'offre que peu d'opportunités commerciales et donc peu de revenus.

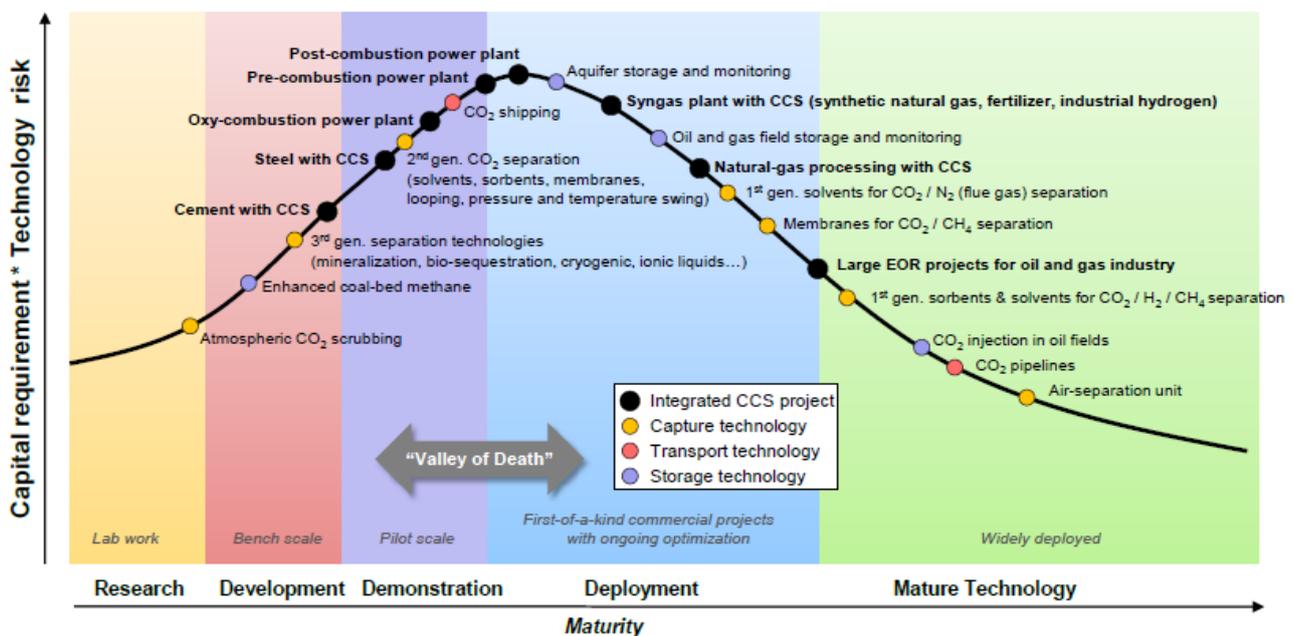


Figure 17 - Courbe des risques d'investissements en technologies CCS et de leurs centrales.

Source : IEA, 2016, 20 years of Carbon Capture and Storage

#### 4.8.7. Les États

Les États<sup>27</sup> sont responsables de créer un cadre propice au développement de la technologie. Que ce soit le régulateur au travers de lois et politiques ou les agences gouvernementales au travers de programmes de recherche et de financements, leur rôle est crucial. La plupart des décisions sont prises au niveau national et international. La participation aux COP n'est accessible qu'à ceux-ci. Or, il est acceptable de considérer ces conférences comme l'un des berceaux de la stratégie climatique mondiale. C'est d'ailleurs à la demande de la COP7 que le GIEC a rédigé son rapport spécial. Le succès ou l'échec des COP influencent grandement les avancées ou reculs en matière de soutien par les autorités, soutien qui est ensuite traduit par les politiques locales.

Nous verrons dans le contexte historique que les mesures prises par certains gouvernements ont eu la capacité de déclencher l'installation d'une unité CCS. Ce fut le cas en Norvège où une taxe sur le carbone a été l'élément déclencheur de Sleipner dans les années 90. Ou à l'inverse, certains gouvernements ont indirectement causé l'annulation de projets, comme la décision prise au Royaume-Uni de clôturer le fonds de financement causant ainsi l'arrêt des deux projets lauréats. Les aspects légaux et politiques sont développés plus en profondeur au point 4.8 et de plus amples informations sont disponibles en annexe.

#### 4.8.8. ONG environnementales

Les ONG environnementales telles que Greenpeace sont de fermes opposants aux CCS. Elles dénoncent principalement le « *Carbon lock-in* » lié à la technologie. Le *lock-in* fait référence à l'inertie des énergies fossiles. Afin de répondre à la menace des changements climatiques, il est nécessaire d'enclencher une transition de nos systèmes énergétiques. Les CCS amplifient ce *lock-in* en véhiculant un message positif autour des EF qui laisserait imaginer que le futur peut être vert, même avec un mix énergétique lourdement tributaire du carbone. La promotion des CCS minimiserait le besoin d'une transition drastique.

Greenpeace s'oppose à la technologie en affirmant que c'est une stratégie du lobby des EF pour pouvoir continuer leurs activités malgré les risques pesant sur notre système climatique. De plus, l'ONG défend que la technologie ne fonctionne pas et parle d'échecs à répétition pour argumenter le fait que les CCS ne parviendront pas à venir à bout des problèmes d'émissions de CO<sub>2</sub>. Certains projets de démonstration de petites envergures fonctionnent, mais aucune grosse centrale n'en est équipée. De plus, comme explicité dans la partie 4.6 sur les impacts environnementaux, les ONG mettent en avant les **incertitudes** et les risques de fuites. Selon elles, l'injection du carbone dans le sol cause des instabilités dangereuses pour les écosystèmes. Celles-ci pourraient réduire à néant les efforts de captage en cas de fuite. De plus, ces technologies étant incapables de s'autofinancer, elles nécessitent une injection de l'argent du contribuable, et ce, même s'il en subira les conséquences dans le futur.

---

<sup>27</sup> Ou groupement d'États tels que l'Union européenne qui est compétente pour de nombreux sujets environnementaux et industriels.

Les Amis de la Terre ne sont pas plus modérés dans leur position. Ils soutiennent que les CCS sont des solutions du XX<sup>e</sup> siècle et qu'elles ne conviennent plus à notre modèle de société actuel. Ils soutiennent que cette technologie se situe à l'opposé d'une stratégie climatique viable. Les CCS causent une augmentation de la consommation d'énergie puisqu'ils diminuent le rendement d'une centrale et induisent une fausse réalité en rendant les EF artificiellement neutres en carbone ou presque.

Beaucoup d'autres associations de défense de l'environnement émettent des opinions négatives à propos des CCS et vu leur poids auprès des citoyens, il est probable que cela joue en défaveur de l'acceptation de la technologie. En tant que lobby, elles peuvent même avoir une influence au niveau national et supranational. Elles agissent donc en tant que porte-paroles contre la technologie.

#### 4.8.9. *Le Marché du carbone*

Aux yeux de la théorie de l'Acteur-Réseau, le marché du carbone est un élément clé du développement des CCS. Il s'agit d'un instrument économique important dans la lutte contre les émissions et un système d'échange de quotas qui est répandu dans le monde entier. Le marché européen est le plus grand des 45 existants actuellement. Parmi ceux-ci nous pouvons citer l'Afrique du Sud, l'Australie, le Brésil, l'Inde, et bien d'autres. Ensemble ces marchés ont le pouvoir d'influencer les décisions d'investissement des organisations qui y sont soumises.

De manière simplifiée, ces marchés fonctionnent avec une structure *Cap and trade*. Un plafond total est déterminé et les participants disposent tous de quotas qui leur sont alloués. Ces quotas couvrent les émissions auxquelles chaque participant a droit. Plusieurs choix s'offrent à un participant. Il peut choisir d'émettre le montant exact de quotas ce qui n'engendre aucune autre conséquence, mais il peut également opter pour une émission plus élevée moyennant l'achat de « permis de polluer » sur le marché ou décider de réduire ses émissions et d'ensuite vendre ses permis superflus. Le marché du carbone comprend donc un mécanisme d'offre et de demande et c'est le point de rencontre entre ces deux variables qui y détermine le cours du prix de la tonne de CO<sub>2</sub>. Il est, aujourd'hui, considéré comme un des mécanismes les plus efficaces et justes pour limiter les émissions<sup>28</sup>.

Le **signal prix** que ce marché donnera est d'une importance capitale, car il déterminera le comportement des entreprises participantes. Si le prix est élevé, un investissement en technologie propre peut s'avérer plus rentable que l'achat de permis. Statistiquement, plus de participants font le choix de l'investissement plutôt que de l'achat de permis, qui devient plus cher avec le temps et donc moins rentable. Certains participants sont également enclins à investir dans les technologies propres afin de baisser leurs émissions au plus bas pour pouvoir revendre leurs quotas non utilisés sur le marché ensuite.

---

<sup>28</sup> Dans la théorie, dans la pratique la réalité s'avère différente.



Figure 18 - Évolution du prix du quota CO<sub>2</sub> (+110 % en 3 ans).

Source : Market Insider, commodities.

## 5. Contexte historique du développement des CCS

La partie 4 s'est attardée sur une description de nombreux aspects caractérisant les CCS et leurs acteurs principaux. Ce développement a eu pour but de fournir les clés de compréhension de l'ensemble de la technologie, des opportunités et freins à son adoption. Dans la partie 5, nous retracerons l'évolution historique des CCS. Celle-ci n'a pas été simple ni linéaire. Nous tenterons, par souci de concision, de n'en relater que les éléments importants. En effet, ce mémoire n'a pas pour vocation d'être une ligne du temps de l'évolution des CCS, mais construit ses conclusions sur base, entre autres, de sa dimension temporelle.

### 5.1. Le début d'une technologie prometteuse

La postcombustion est utilisée depuis les années 1920 pour la production de CO<sub>2</sub> alimentaire, c'est-à-dire le gaz carbonique employé pour l'eau pétillante et les boissons sucrées. Pour cette application, le CO<sub>2</sub> doit être extrêmement pur et les unités le produisant sont petites. Cette méthode ne peut pas être transposée telle quelle pour des centrales électriques ou industrielles de plus grandes échelles. À partir des années 1930, le CO<sub>2</sub> est séparé du gaz naturel pouvant être présent dans les gisements et en constituer presque 70 % du contenu. Pour pouvoir vendre le gaz, il fallait le traiter afin qu'il puisse répondre aux spécifications techniques du marché. Cependant, le CO<sub>2</sub>, une fois séparé, était relâché dans l'atmosphère. Il a fallu attendre les années 1970 pour qu'une utilité soit trouvée à ce dioxyde de carbone. En effet, un groupe d'entreprises pétrolières a alors décidé de s'en servir pour l'injecter dans un puits de pétrole qui se vidait. Pendant les années 1980 et 1990, les activités de récupération assistée de pétrole ont été largement supportées par le gouvernement américain grâce à un régime fiscal

avantageux (IEA, 2016). Ainsi, deux nouveaux projets ont vu le jour : une unité de traitement de gaz naturel et une usine produisant des fertilisants<sup>29</sup>.

Le prix du pétrole était relativement bas jusqu'au début des années 2000, ce qui aurait normalement dû décourager les investissements de nature énergétique. Pourtant, d'autres projets CCS ont continué à voir le jour. C'est le cas, par exemple, de Sleipner en Norvège. En 1991, le gouvernement norvégien a instauré une taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> offshore. Ce fut l'élément déclencheur pour Statoil qui lança en 1996 la première unité de stockage géologique du carbone en l'injectant directement dans une formation saline rocheuse. En 1995, dans leur second rapport, le GIEC a qualifié les CCS de technologies prometteuses en reconnaissant leur potentiel, mais a souligné le manque de connaissances sur les effets long terme du stockage souterrain du CO<sub>2</sub>.

Sleipner et les 3 unités américaines ont servi de base à de nombreuses recherches sur les impacts sismologiques, sur le comportement du CO<sub>2</sub> souterrain et sur les techniques utilisées pour leur capture. Ces exemples, ainsi que le travail acharné des scientifiques, des ingénieurs et de bien d'autres acteurs, semblent avoir démontré la faisabilité de la technologie ainsi que sa sûreté sur le long terme. Elles ont d'ailleurs suscité un intérêt accru et une certaine reconnaissance.

## 5.2. Engouement du début des années 2000

En 2003, le premier sommet ministériel du Carbon Sequestration leadership forum a eu lieu en Virginie, aux États-Unis. Ce sommet avait pour but de travailler sur la rentabilité des CCS, celle-ci étant, depuis le début, un frein important. En travaillant sur les aspects financiers, les participants espéraient pouvoir favoriser le déploiement grâce à une collaboration internationale.

En 2005, le rapport spécial du GIEC sur les CCS a annoncé un tournant important dans leur reconnaissance par les scientifiques du climat. Celui-ci a nettement amélioré leur réputation au sein de la communauté scientifique, leur permettant d'être enfin considérées comme une option envisageable dans le cadre de la réduction des émissions.

En 2008, au sommet de Hokkaido Toyako, les décideurs du G8 ont exprimé leur soutien pour cette initiative et ont projeté le développement massif des CCS d'ici 2020. Ils se sont, d'ailleurs, engagés à soutenir 20 projets CCS d'ici l'horizon 2010. C'est à ce moment-là que furent créés le « Global CCS Institute » ainsi que la première feuille de route pour CCS de l'IEA.

L'Union européenne s'est ensuite lancée dans un vaste travail d'évaluation de la technologie qui finit par aboutir en 2009 par une directive sur le stockage du carbone. Un vaste effort de recherche et de

---

<sup>29</sup> La liste des unités CCS se trouve à l'annexe 8.1.

développement est alors enclenché à l'échelle mondiale. En 2010, les engagements financiers en faveur de ces technologies s'élevaient à 30 milliards d'USD.

L'AIE évaluait alors le potentiel des CCS à environ 20 % des efforts de réduction des émissions en 2050 dans le cas du scénario de division par deux des émissions anthropiques mondiales entre 2005 et 2050.

Les projections de baisse des coûts étaient ambitieuses. Elles tablaient sur un déploiement massif et un effet boule de neige qui n'ont pas eu lieu. Les spécialistes savaient que l'aspect financier était un frein important et comptaient sur les projets pilotes pour avancer l'expérience requise. La figure 19 ci-dessous montre une courbe de coût générique pour une innovation technologique réussie. Sur un tel graphique, le coût diminue en fonction du temps, mais uniquement si la technologie en question se développe : le développement au cours du temps est appelé expérience. C'est ce qui figure en abscisse. La deuxième figure ci-dessous illustre, quant à elle, la courbe de réduction de coûts pour les CCS en fonction du taux d'apprentissage. Le temps s'est écoulé depuis lors et nombreux des projets prévus lors de cette estimation ont été annulés, empêchant alors d'accomplir l'apprentissage nécessaire pour faire baisser ces coûts jusqu'à ce niveau.

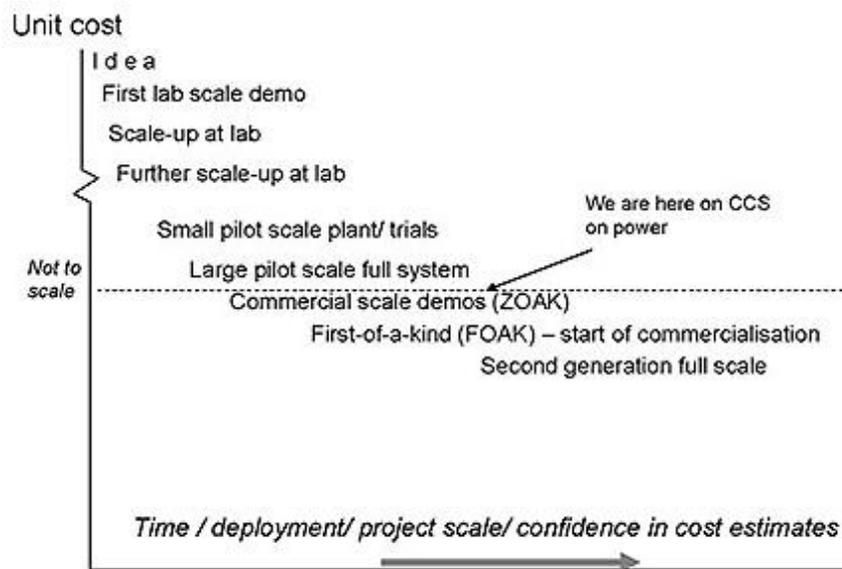


Figure 19 - Courbe de coûts théorique d'une innovation technologique réussie

Source : Global CCS Institute, 2012, Potential cost reductions in CCS in the power sector

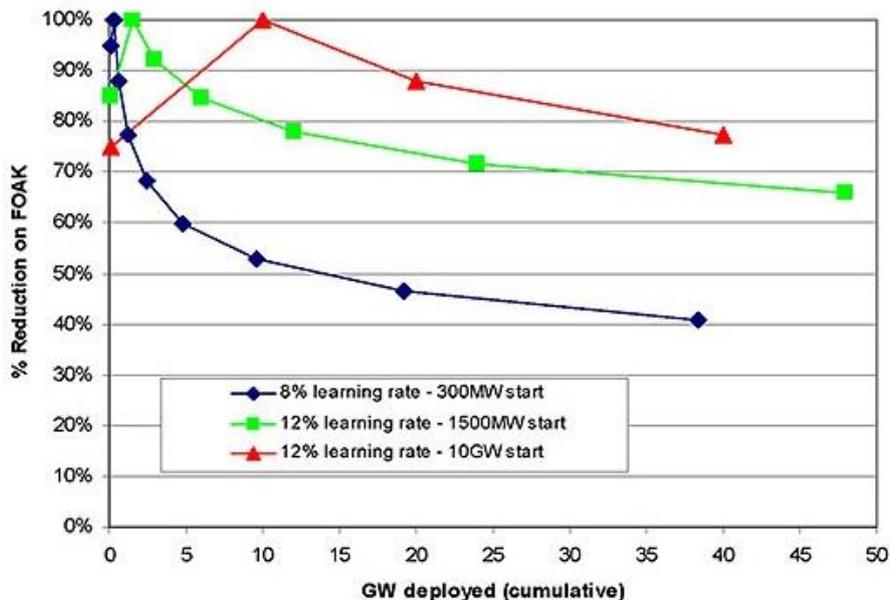


Figure 20 - Pr evision de la courbe de coûts en fonction de l'apprentissage

Source : Global CCS Institute, 2012, *Potential cost reductions in CCS in the power sector*

### 5.3. Essoufflement de la fin des années 2000

Au lendemain de la **crise financière** de 2008, les gouvernements se sont focalisés sur sa résolution, entrainant alors un essoufflement de l'engouement des années 2000. En 2009, l'échec des négociations climatiques de la Conférence des Parties de Copenhague a contribué à la dégradation de l'ambition climatique. Dans les années qui suivirent, la vitesse de déploiement des CCS fut nettement inférieure aux prévisions initiales. L'ensemble des projets dans le *pipeline* connu, lui aussi, une diminution. En 2010, 77 projets de grande envergure étaient en cours d'évaluation, mais en 2016, il n'en existait plus que 38 dont aucun n'avait progressé depuis 2014. Une stagnation est même prévue à l'horizon 2020-2025 étant donné le faible nombre de projets actuellement prévus. En effet, si l'ensemble des projets à l'étude en ce moment se concrétisait, cela ne représenterait qu'un sixième des infrastructures nécessaires selon le scénario 2DS pour 2025<sup>30</sup>. Rien qu'entre 2010 et 2016, 20 projets de large envergure ont dû être annulés malgré leur stade avancé<sup>31</sup>. Pourtant, la Chine a estimé que plus d'un tiers des 900 GW de centrales au charbon dont elle dispose pourrait être équipé de CCS. C'est un fait, le déploiement des CCS tel qu'il est aujourd'hui est complètement déphasé par rapport aux ambitions de Paris.

<sup>30</sup> Le scénario 2DS prévoit que les CCS délivrent 94 Gt de réductions d'ici à 2050.

<sup>31</sup> La liste complète des projets annulés à l'annexe 8.9.



Figure 21 - Réduction du nombre de projets en phase de développement au cours du temps

Source : Global CCS Institute, *Energy Technology Perspectives 2017*

Même si la reconnaissance scientifique du rôle que pourraient jouer les CCS dans le combat contre le réchauffement climatique s'est nettement améliorée au cours des années 2000, les politiques et le support financier promis par les états n'ont fait que fluctuer. Après 2009, la majorité des financements publics promis ont dû être réduits ou simplement annulés, aussi bien en Europe qu'aux États-Unis et en Australie. Plus récemment, en 2015, le Royaume-Uni a renoncé au financement d'un milliard de GBP promis alors que celui-ci était en phase finale de sélection de projets. De plus, l'avancement des CCS a subi de lourdes conséquences suite à l'annulation de deux projets majeurs : l'un devait être le premier projet à grande échelle de captage par oxycombustion et l'autre le premier projet majeur de captage du CO<sub>2</sub> sur une centrale au gaz.

L'industrie chimique, les cimenteries et la sidérurgie sont des activités dont l'empreinte carbone est considérable. Or, la demande pour ce genre de matériaux ne cessera d'augmenter dans le futur. Un engagement fort en faveur d'une industrie propre continue de manquer. L'EU ETS a échoué quant à l'optimisation de la production. Après presque 15 années d'existence, le marché commence seulement à se stabiliser. Bien que les procédés de fabrication se soient améliorés depuis la fin du siècle passé, le chemin vers la neutralité est encore long.

Le protocole de la convention de Londres (1996), traitant de la prévention de la pollution marine par le déversement de déchets dans la mer dans le cadre des CCS, a été interprété par de nombreuses parties comme empêchant les exports de CO<sub>2</sub> pour injection offshore, et ce, d'un pays signataire vers un autre. Malgré qu'un amendement ait été rédigé en 2009, peu de pays l'ont ratifié en 2011. Celui-ci, appelé Article 6, devait permettre le transport transfrontalier de CO<sub>2</sub> devant être stocké géologiquement. Pour rentrer en vigueur, deux tiers des parties devaient le ratifier. Cela traduit donc un manque d'engagement malgré les recommandations d'organisations supra nationales telles que le *Carbon Capture, Use and Storage Action Group*.

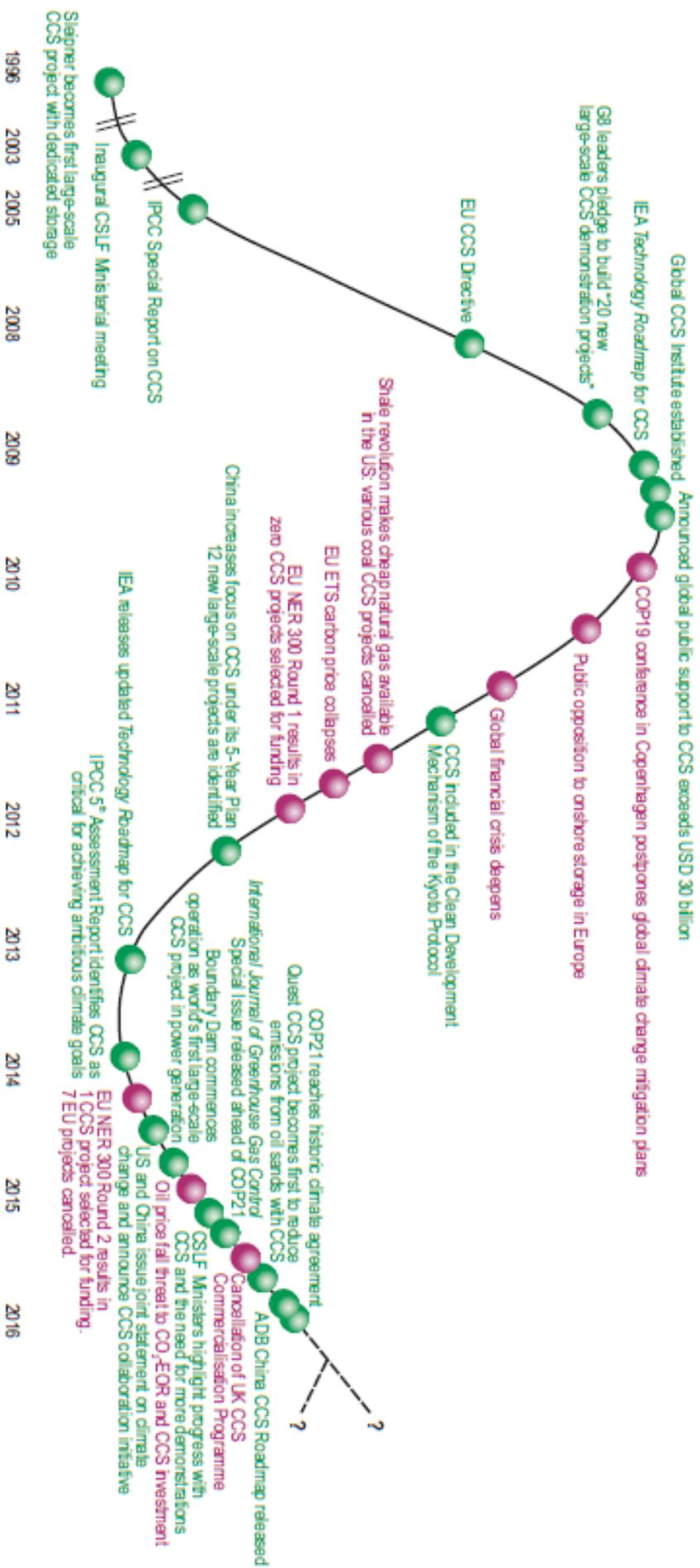


Figure 22 - Evolution des politiques CCS et du support politique.

Source : IEA, 2016, 20 years of Carbon Capture and Storage

#### 5.4. Après 2014, amorce de la reprise

Le support politique étant passé par un minimum en 2013 s'est ensuite amélioré. La mise en service de Boundary Dam (BD) au Canada a annoncé le début d'un intérêt grandissant. BD a été la première unité de CCS de grande envergure à capter les gaz de combustion d'une centrale au charbon. Cette décision a suivi l'instauration par le gouvernement canadien d'une norme stricte concernant les émissions des centrales au charbon.

Cette unité utilise la technologie de postcombustion dont l'absorption est assurée par un solvant composé d'amines. Elle permet de capturer jusqu'à 1 Mt de CO<sub>2</sub> par an pour une production de 115 MW. Cela faisait d'elle la centrale au charbon la plus propre au monde. Une partie du CO<sub>2</sub> est ensuite transportée par pipeline vers des gisements de pétrole pour du EOR. La partie restante est envoyée vers une zone de séquestration prenant part à un vaste plan de recherche. Ce dernier étudie les effets du stockage dans une formation de grès et de saumure. Ce projet mené par SaskPower est considéré comme un succès grâce au soutien financier de la vente du CO<sub>2</sub> aux projets d'EOR et aux subsides fédéraux (240 millions de CAD). Le groupe estime d'ailleurs que grâce au retour d'expérience, ils pourront baisser le coût en capital de 25 à 30 % et le coût d'opération de 25 % pour une prochaine unité. De plus, SaskPower, en collaboration avec BHP Billiton a établi un centre de collaboration et d'étude du CCS, afin de promouvoir et de partager l'expérience du Boundary Dam Project.

En 2014, suite au rapport 5 du GIEC mettant en avant l'impossibilité d'atteindre les objectifs de nombreux scénarios sans l'aide des CCS, le monde scientifique a commencé à leur reconnaître l'utilité. Celui-ci a également révélé que sans les CCS, limiter les concentrations de 430-480ppm de CO<sub>2</sub> équivalent dans l'atmosphère pourrait être jusqu'à 138 % plus chère.

Fin 2015, le Canada a lancé le projet The Quest qui capture le CO<sub>2</sub> provenant de la transformation de sables bitumineux en pétrole conventionnel. Quest prévoit de capter plus d'un million de tonnes de CO<sub>2</sub> par an et d'en stocker la totalité dans une formation géologique à plus de 2000 m de profondeur. Ce projet est piloté par Shell. Il bénéficie d'importants subsides des gouvernements d'Alberta et du Canada : en tout ce sont près de 865 millions de CAD (570 millions d'EUR) qui ont été versés en échange d'un vaste programme de publication d'informations.

Dans le futur, les retours d'expérience devront permettre une baisse continue des coûts, de perfectionner la technique et d'améliorer l'attractivité des CCS. De nombreuses entreprises détiennent maintenant leurs propres systèmes de CCS telles qu'Aker Clean Carbon, Carbon Clean Solutions Ltd, Alstom, Hitachi, etc. Cela signifie que les acteurs peuvent désormais distribuer leurs modèles à l'échelle commerciale. La concurrence naissante devrait contribuer à baisser les coûts grâce à l'amélioration graduelle des performances. Rendre la technologie plus abordable reste à l'heure actuelle une priorité pour la recherche et le développement.

Même si l'avenir semble prometteur, les CCS sont encore loin d'arriver au stade de développement nécessaire pour avoir un impact durable sur le climat. Le retard pris dans leur développement met en doute leur capacité effective à participer à la réduction des émissions totales.

## 6. Raisons de l'échec

Depuis le début des années 2000, la communauté scientifique montre un intérêt grandissant à propos des CCS. En 2005, l'édition du rapport spécial du GIEC résulte de cette effervescence. L'engouement général qui s'est formé autour de ces technologies a désormais gagné les différents organismes.

Selon la théorie de l'acteur réseau, tous les **facteurs** contextuels doivent être considérés de manière symétrique. Ceux-ci sont composés de deux types de causes : socio-économiques, qui concernent l'environnement dans lequel l'innovation se développe, et techniques, qui concernent l'innovation elle-même ainsi que ses qualités intrinsèques.

Les circonstances de l'environnement socio-économique des CCS n'ont pas joué en sa faveur, et cela malgré le nombre d'acteurs considérant le climat propice à son développement. Le manque de consensus politique a créé un climat d'incertitude peu favorable. En effet, beaucoup de questions sont restées non résolues, dont celle sur la répartition des responsabilités concernant le stockage du CO<sub>2</sub> (M. de Figueiredo et al., 2007). Un projet de stockage s'étendant sur plusieurs siècles, comment déterminer les responsables ? S'agit-il du gouvernement ou des exploitants ?

Le critère financier autant que les aspects politiques ne peuvent pas, à eux seuls, expliquer le succès ou l'échec d'une innovation. Les différents facteurs sont un ensemble constamment en interaction dont les actions sont indissociables. Le **modèle de l'intéressement** nous rappelle l'importance de traiter de manière symétrique les facteurs externes et internes à l'innovation.

Les différents modèles et projections du début des années 2000 étaient fort différents de la situation actuelle. Ainsi, la question principale qui a induit ce mémoire, le **pourquoi**, doit être étudiée. Dans le cadre de ce travail, sa complexité empêche une structure simple séparant les aspects politiques, financiers et environnementaux. Tous ceux-ci s'entremêlent au fil de l'évolution. Grâce à l'étude de l'historique des CCS (au chapitre 5), plusieurs sous-questions ont été isolées. Celles-ci permettent de répondre à certains éléments qui semblent avoir joué un rôle. Il s'agit de plusieurs interrogations qui décomposent le **pourquoi ?** principal en **et si ?** intermédiaires. La décomposition de la question principale tentera de décrire les différents aspects identifiés lors des recherches bibliographiques. Ce chapitre sera donc décomposé en 9 sous-questions qui aideront le lecteur à mieux comprendre les dimensions de l'échec du développement des CCS.

## 6.1. Le rôle des pouvoirs publics était-il adéquat ?

Les CCS ont subi un manque indéniable de support politique critique. Bien que les technologies de base nécessaires aux CCS soient connues, elles restent entourées d'incertitudes et de risques causant des difficultés de mise en place. Elles sont apparues dans les années 80 à l'échelle industrielle. Il fallut par contre attendre 2009 pour que l'Union européenne y consacre une réglementation malgré que le Conseil se soit mis d'accord en 2007 sur la poursuite d'une stratégie agressive pour le déploiement des CCS en Europe. Aujourd'hui, le portfolio de projets en cours de développement reste mince, quand bien même le GIEC et ses experts soutiennent leur place dans les politiques climatiques en tant qu'action d'atténuation à haut potentiel.

Au moins la majorité des centrales du parc énergétique mondial au charbon (1950 GW) devrait s'équiper d'unités CCS dans le cadre d'une politique climatique ambitieuse et cohérente. Le charbon représentait, en 2016, 40 % du mix électrique mondial. Une part importante de ces centrales restera opérationnelle pendant les décennies à venir. Le charbon permet d'assurer à moindre coût la sécurité énergétique des pays en voie de développement grâce à une ressource bon marché et abondante. Ainsi, le nombre de ces centrales devrait encore augmenter. Pourtant, en signant l'Accord de Paris, les Parties se sont engagées à faire plafonner les émissions de CO<sub>2</sub> le plus vite possible.

Même avec une reconnaissance scientifique grandissante, le support politique n'a que peu évolué ces dernières années. Malgré que l'Europe veuille se positionner au cœur de la transition bas carbone, elle n'a pas su, ou pu, transformer ses intentions en actions. Le monde politique semble ne pas envisager les CCS à court ou moyen terme. Pourtant, le défi climatique est tel qu'aucune technologie ne devrait être négligée. Tous les moyens sont à considérer pour atteindre les réductions d'émissions nécessaires.

La directive européenne de 2009 concernant le stockage géologique du carbone n'a pas atteint son ambition. Les EM devaient la transposer pour juin 2011, mais 11 d'entre eux interdisent ou restreignent toujours les CCS. De plus, 7 EM n'ont pas complètement ou correctement transposé la directive dans leur législation nationale (P. Collet, 2014). Il y a donc un fossé important entre l'opinion des États et ce qui se trouve dans la feuille de route de l'UE, Énergie 2050. Le conservatisme énergétique et industriel de Bruxelles est dénoncé par certains députés en accusant les CCS d'être un pansement sur une hémorragie (Y. Jadot, 2011). Les disparités de transposition font de l'Union européenne un territoire peu uniforme en matière de législation CCS. Certains EM ont désigné leurs autorités environnementales comme compétentes et au vu de la mauvaise réputation de ces technologies auprès de ces instances, la prise de position de l'État en question n'est pas favorable.

Le manque de support politique pour les CCS a causé un retard dans leur déploiement en comparaison avec les autres technologies bas carbone. Les CCS ont été négligées dans les discussions de politiques énergétiques et d'atténuation des changements climatiques. Ce désintérêt a largement profité aux renouvelables ainsi qu'aux mesures d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Une politique efficace et ciblée, comme celle des énergies renouvelables, peut faire exploser l'innovation. Elle permet généralement un déploiement massif et une baisse importante des coûts au-delà des premiers espoirs. Un support politique adéquat a la capacité de créer un contexte propice aux investissements nécessaires à la généralisation d'innovation. Les ER ont connu pendant les années 2000 une ascension fulgurante. Leurs avantages, tels que l'inépuisable des ressources ou leur impact environnemental limité, les rendent attractives. Par contre, elles restent marquées par de nombreux inconvénients qui les empêchent actuellement d'être totalement compétitives : le stockage de l'énergie qu'elles produisent et le raccordement au réseau restent problématiques. Au niveau financier aussi les ER montrent des difficultés. Malgré les récents progrès technologiques, sans aide, elles continuent d'être considérées comme coûteuses. Un cadre solide est nécessaire pour garantir un contexte socio-technico-économique stable. Le soutien public a permis d'améliorer la confiance de la population. Les aides ont supporté le lancement de nouvelles filières partout dans le monde. Mais c'est surtout un cadre législatif clair et stable qui encouragera les investissements et la croissance.

Malgré les nombreux points communs entre les CCS et les ER, le fossé les séparant se creuse. L'UK *Oxburgh Report* rédigé en 2016 propose une approche innovante. L'État pourrait créer une entreprise publique qui prendrait à son compte la responsabilité et les risques relatifs aux CCS. La construction des premières unités se ferait sous l'initiative du gouvernement qui serait détenteur des infrastructures. Les inquiétudes face à la rentabilité et au flou juridique pourraient ainsi être contournées. Lorsque cette entreprise publique deviendrait commercialement viable, sa privatisation permettrait de récupérer l'investissement de base. Ce montage confirmerait les craintes de Greenpeace et des ONG environnementales en général. Les coûts et les responsabilités pèseraient indirectement sur la population pour une technologie qui n'est selon eux pas prouvée.

## 6.2. Est-ce une technologie trop chère ?

Selon la littérature, le coût financier des CCS reste l'un des principaux freins à leur déploiement. Le *think tank* américain *Energy Innovation* travaille sur les politiques énergétiques et environnementales. Il estime que les CCS sont l'option la plus chère à mettre en place pour atteindre les réductions d'émissions nécessaires<sup>32</sup>. La structure de coûts des CCS s'ajoute à celle de la centrale d'accueil. L'installation de l'unité CCS, la séparation et l'énergie supplémentaire nécessaire élèvent ce montant de manière non négligeable.

Les CCS sont des technologies coûteuses à forte intensité en capital. Elles ont tendance à rendre les investisseurs frileux. Une unité de CCS ne produira pas de revenus qui pourraient améliorer leur rentabilité<sup>33</sup> puisqu'il n'y a pas de **marché** pour le CO<sub>2</sub> séparé à l'heure actuelle (excepté l'EOR ou certains cas de réutilisation). Le prix du captage et stockage du CO<sub>2</sub> se situe aux alentours de 60 €/t de CO<sub>2</sub>. Pourtant, les calculs de l'IEA estiment que le coût de la transformation du secteur énergétique serait d'environ 3 500 milliards d'USD plus cher sans les CCS pour une réduction de 70 % des émissions

---

<sup>32</sup> C'est aussi l'avis de Mc Kinsey dont la *GHG Abatement Cost Curve* à la figure 25 situe les CCS à l'extrême droite.

<sup>33</sup> Du moins tant qu'il n'y a pas de signal prix sur le carbone.

dans le scénario 2DS. En effet, le parc énergétique devrait alors être renouvelé plus rapidement. Ceci aurait deux effets majeurs. D'une part, les investisseurs devront considérablement s'endetter afin d'augmenter la vitesse des placements pour garantir la sécurité d'approvisionnement énergétique. Le renouvelable et/ou le nucléaire devra subir un déploiement massif et augmenter de 1 900 GW d'ici 2050, ce qui équivaut à quatre fois le parc éolien et solaire photovoltaïque de 2016 (IEA, 2016). Ils devront aussi assumer les pertes dues à la fermeture prématurée du parc énergétique traditionnel. D'autre part, ceci causerait une augmentation considérable de **l'énergie grise**. Les centrales au charbon et au gaz devant être détruites avant la fin de leur durée de vie prévue, il faudra produire massivement de nouvelles unités de production d'énergie renouvelable.

Au cours de la décennie précédente, la baisse du prix des matières premières a eu tendance à décourager les investissements dans les domaines énergétiques - gaz, charbon, pétrole, électricité, affectant fortement les CCS. De plus, de nombreux acteurs européens estiment qu'aujourd'hui les CCS sont trop chers et qu'il faudrait attendre que la Chine s'empare de la technologie. Elle investirait dans son évolutivité pour que l'Europe puisse l'importer à moindre coût ensuite, copiant le modèle des ER (ENGO network, 2013). Cet argument reflète la réalité inquiétante du manque de compréhension de la part des autorités de l'intérêt des CCS à **court terme**. De nombreux acteurs attendent un **déclencheur à la baisse de prix** qui ne semble pas arriver, plutôt que de le créer.

L'histoire nous montre que lorsqu'une technologie est chère, le déploiement massif est la première cause de réduction de prix, et ce pour plusieurs raisons : le retour d'expérience, les économies d'échelle, la libéralisation du marché, etc.

Le manque de clarté du cadre légal entourant les CCS affecte aussi les *cash flows* en ayant un impact sur la confiance des investisseurs et donc sur la viabilité financière en général (Watson et al, 2012). Les énergies renouvelables ont vu leur coût diminuer drastiquement en dix ans. Le secteur a été fermement régularisé créant ainsi un climat de confiance sur la vision à long terme de la technologie. Les ER peuvent être qualifiées de succès. Pourtant, à leurs débuts, le coût était si élevé que les gouvernements ont mis presque dix ans à s'engager franchement. Après plusieurs campagnes de subsides, de réductions de taxes et autres mesures de soutien, le coût du photovoltaïque a diminué de plus de 50 %.

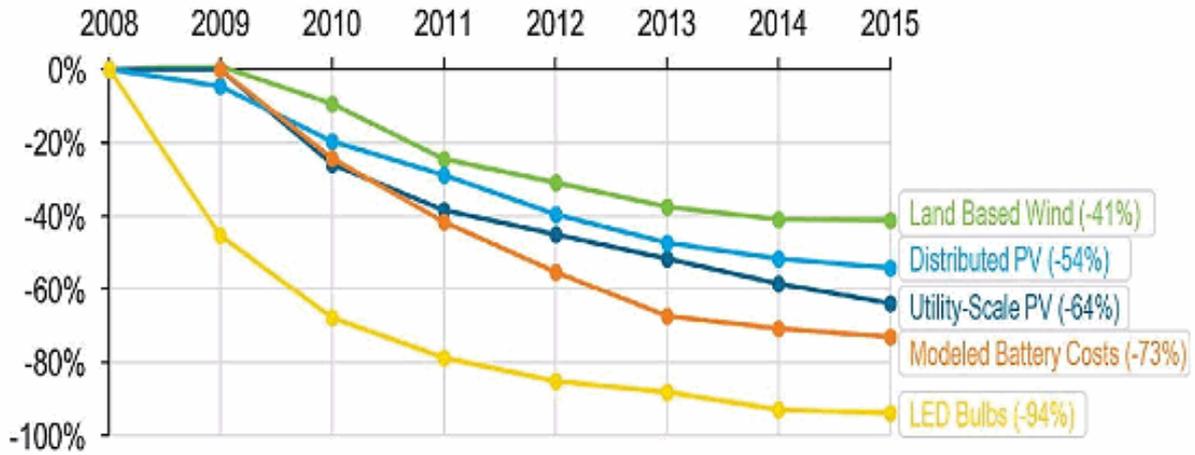


Figure 23 – Réduction du coût des énergies renouvelables entre 2008 et 2015 aux USA en %

Source : Wood D. 2016

À l'inverse des CCS, leur déploiement massif a créé un élan qui a permis de profiter d'un retour d'expérience élevé et d'ainsi diminuer les coûts. Lorsque la technologie a fait ses preuves, la Chine s'est emparée du modèle pour produire à grande échelle, accentuant ainsi la baisse des prix et l'augmentation du déploiement. Le taux d'installation d'ER a même dépassé en 2016 celui du charbon, leur promettant alors un bel avenir.

La figure 24 ci-dessous compare, à puissance égale, le prix de Boundary Dam au prix de l'énergie éolienne. BD est une centrale au charbon équipée de CCS au Canada produisant une électricité propre pour 130 000 ménages. Le graphique démontre clairement une différence énorme qui limite l'attractivité de ces technologies dans les conditions actuelles.

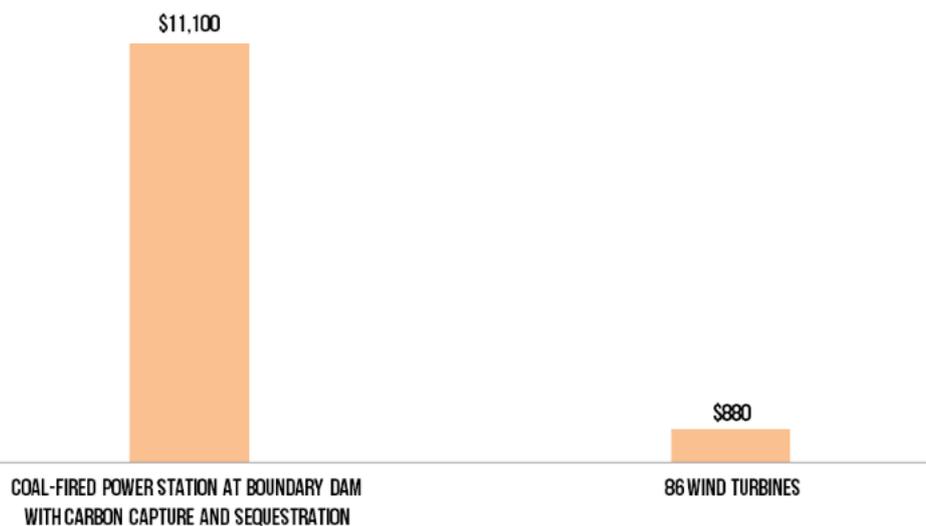


Figure 24 – Comparaison du coût d'évitement d'émission entre une centrale au charbon équipée de CCS et des éoliennes à puissance égale

Source : SaskPower website, 2018

La complexité de la chaîne de valeur représente un vrai défi. Les acteurs étant interdépendants, ils attendent que l'un d'entre eux soit le précurseur. Les opérateurs estiment qu'avec un réseau de *pipelines* plus développé, cela faciliterait les connexions pour les unités de captures placées sur leurs centrales. Mais les entreprises de forage, elles, responsables pour la séquestration, ne veulent pas s'engager sans promesse de volume – promesse qui n'arrive pas vu la difficulté dans laquelle se trouve l'étape de capture. Grâce à une demande claire du marché, ces acteurs pourraient être alignés. Dans le cas des CCS, à part l'EOR, celui-ci est presque inexistant. Ainsi, la chaîne de valeur aurait besoin d'une coordination de la part du gouvernement pour organiser sa complexité. Les acteurs comptent sur le développement de l'infrastructure, qui elle-même dépend d'eux. Il s'agit d'un dilemme d'échelle dont il est difficile de sortir et qui est similaire à d'autres innovations de réseau. L'infrastructure doit se développer, mais cela représente un risque important sans le volume nécessaire. Les économies d'échelle, qui permettront de bénéficier de réduction de coûts, ne seront atteintes que grâce au levier financier des états.

Lorsqu'une unité CCS est ajoutée à une centrale électrique, elle entraîne un surcoût qui, en l'absence de mesures incitantes, limite sévèrement son attractivité au niveau d'investisseurs potentiels. Même si leur efficacité était drastiquement améliorée, elles ne deviendraient jamais gratuites, les lois de la physique les en empêchent. L'énergie sera toujours nécessaire à son fonctionnement. Ainsi, ce sera toujours plus cher d'utiliser des CCS que de ne pas en utiliser, à moins que le CO<sub>2</sub> n'ait un signal prix grâce à un instrument financier, comme une taxe ou plutôt un marché du carbone. Ainsi, émettre du CO<sub>2</sub> aurait un coût.

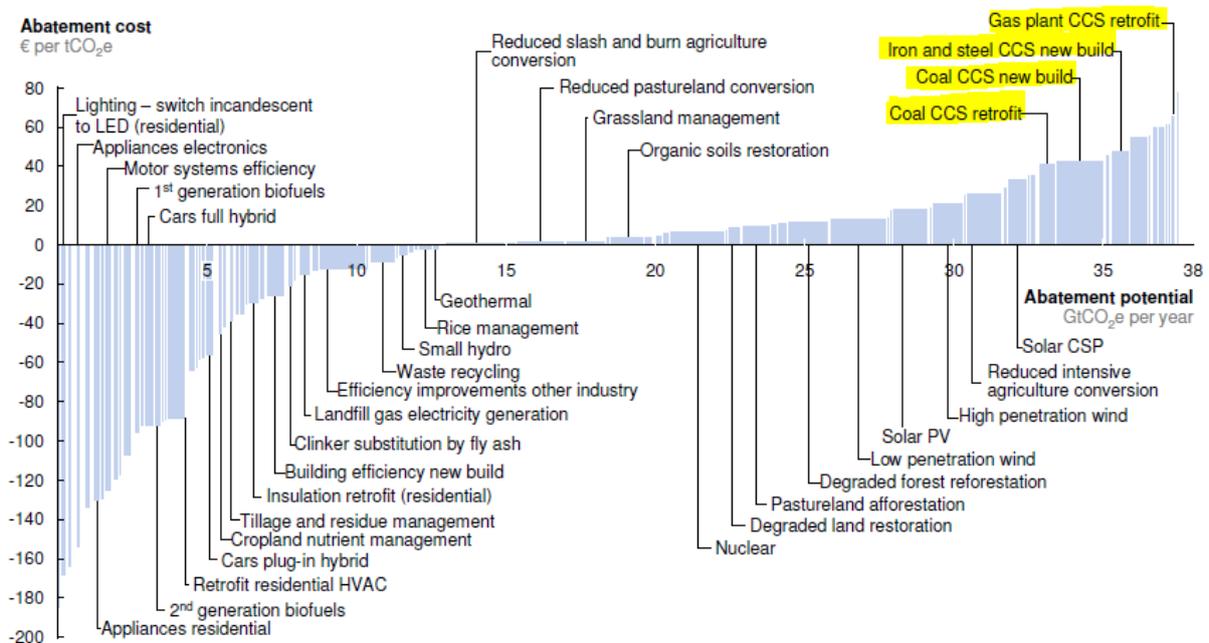


Figure 25 – McKinsey courbe du coût net de réduction des émissions de gaz à effet de serre

Source : McKinsey&Company, 2010

### 6.3. Y a-t-il un lien avec le manque de signal prix pour le CO<sub>2</sub> ?

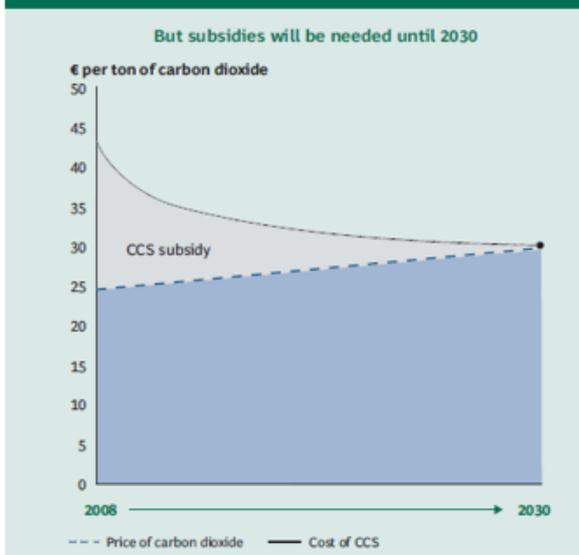
« Aujourd'hui, personne ne prend la responsabilité de développer la capture, le transport et le stockage du CO<sub>2</sub> même si tout le monde est favorable à une réduction des gaz à effet de serre. Sans les incitations économiques, les industriels ne s'engageront pas dans cette voie. » (Minh Ha Duong, 2009)

Le **signal prix** vise à mettre une valeur sur une tonne de carbone émise afin de pouvoir internaliser cette externalité. Il s'agit d'intégrer au marché et ses transactions les impacts négatifs des activités anthropiques. Les techniques les plus simples sont les instruments économiques classiques avec d'une part la taxe carbone, décidée unilatéralement et d'autre part le marché du carbone.

En Europe, l'idée de ce marché est plus largement acceptée que la taxe, car il permet plus de flexibilité. Il en existe 45 dans le monde et l'EU ETS est le plus substantiel. La notion de signal prix a été plusieurs fois mentionnée au cours du mémoire dû à son importance. La particularité des CCS étant d'être un **coût net**, ce concept est essentiel. En l'absence d'opportunité de vente pour le CO<sub>2</sub> séparé, le seul moyen d'estimer la rentabilité des technologies est d'admettre que l'émission du CO<sub>2</sub> a un coût à son tour. Ainsi, relâcher des gaz de combustion dans l'atmosphère ne sera plus gratuit (ou presque), les CCS auront une réelle chance de présenter un *business case* favorable. Émettre du CO<sub>2</sub> est depuis longtemps trop bon marché (Global CCS Institute, 2015).

Pendant les années 2000, les cabinets de consultance se sont penchés régulièrement sur les technologies relatives à l'atténuation des changements climatiques. En 2008, le *Boston Consulting Group* (BCG) a publié une étude qui sera reconnue par de nombreux organismes. Celle-ci étudiait les perspectives de rentabilité des CCS. Elle décrivait une courbe représentant la réduction du coût de ces technologies et une estimation de l'évolution du prix du carbone lui-même. À sa sortie, cette étude a été extrêmement bien accueillie grâce au message positif qu'elle véhiculait. La combinaison d'un coût en décroissance et d'un signal-prix du carbone en augmentation constante rendait les CCS autosuffisantes dès 2030. En attendant le seuil de rentabilité, l'État devrait couvrir la différence par des subsides. Le secteur se réjouissait d'une projection pareille. Pourtant, dans les premiers mois qui suivirent sa publication, les perspectives changèrent : la crise financière s'installa. Elle entraîna indirectement un effondrement du marché du carbone européen. Pour que les prévisions de BCG restent valables, il aurait fallu que le marché récupère rapidement pour finir à 30 €/t de CO<sub>2</sub> en 2030 et que l'État couvre la nouvelle différence. Ni l'un ni l'autre ne sembla se réaliser : l'EU ETS est resté longtemps inefficace, même s'il montre une reprise encourageante depuis ces derniers mois. La crise ayant touché si fort les économies européennes et américaines, les gouvernements n'étaient plus aptes de subsidier les CCS et étaient incapables de combler la différence nécessaire. De plus, du fait des nombreuses annulations de projets, la courbe de coût ne s'est pas comportée comme décrite sur le graphique.

**Exhibit 1. The Carbon Dioxide Market Price Could Cover CCS Costs by 2030 in Europe and North America**



**Exhibit 1. The Carbon Dioxide Market Price Could Cover CCS Costs by 2030 in Europe and North America**

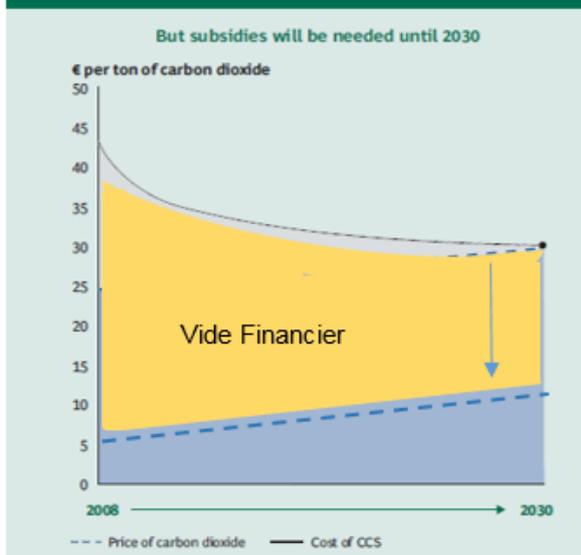


Figure 26 – BCG : Courbe de coût des CCS et prix du carbone

Source : The Boston Consulting Group, 2008

En l'absence de marché, le coût élevé peut être compensé d'une autre manière, c'est le rôle du signal prix. Si, comme dans les prévisions de BCG, le prix du carbone continue d'augmenter et les coûts des CCS de diminuer, il arrivera un moment où la centrale équipée de CCS sera plus rentable que la centrale traditionnelle devant s'acquitter de lourdes charges d'émissions (M. Renner, 2014). Cette étude se base sur le coût de l'électricité et sur un choix du coût du capital. Elle démontre que le signal prix, dans ce cas-ci le prix du carbone sur le marché, devrait atteindre 115 €/t de CO<sub>2</sub> en Europe et 45 €/t de CO<sub>2</sub> en Chine. La variété d'études tentant de déterminer le prix du carbone nécessaire à une rentabilité est aussi étendue que les études tendant à déterminer le coût des CCS lui-même.

Une dimension qui est bien souvent ignorée est le coût du capital mentionné ci-dessus. Il s'agit du taux d'intérêt applicable à l'investissement nécessaire à l'installation de CCS. Celui-ci peut varier selon de nombreux scénarios. Le tableau ci-dessous en montre trois : premièrement, tous les investissements sont soumis au même régime, le taux de 8 % est applicable aux centrales ainsi qu'aux CCS ; deuxièmement, le gouvernement couvre une partie de l'investissement ce qui permet de réduire le taux à 5 % relatif aux CCS ; et troisièmement, les investisseurs se méfient de ces technologies et proposent un taux de 12,5 % contre 8 % pour le reste de la centrale.

Ref. fossil tech.	Coal with CCS		
	Case 1	Case 2	Case 3
	8% capital cost	5% capital cost	12.5% capital cost
Gas CCGT 8% capital cost	Carbon price 85€/tCO <sub>2</sub>	Carbon price 50 €/tCO <sub>2</sub>	Carbon price 120€/tCO <sub>2</sub>
Coal plant 8% capital cost	Carbon price 35€/t	Carbon price 20€/t	Carbon price 54€/t

Figure 27 – Prix du carbone nécessaire pour rendre les CCS rentables

Source : D. Finon, 2017

Ces différents scénarios mettent en avant le rôle des organismes de financement, qu'ils soient privés, en présentant des taux bancaires acceptables, ou publics, en étant capables de faire baisser le coût total de l'investissement.

#### 6.4. La crise de 2008 a-t-elle mis du plomb dans l'aile des CCS ?

La crise de 2008 a touché sévèrement le monde. Le prix de l'énergie s'est effondré, les conditions d'accès au capital se sont compliquées et les taux d'échanges sont devenus particulièrement volatils – autant d'exemples qui démontrent un climat d'incertitude jetant un froid sur les priorités climatiques. Les risques des transactions marchandes étant élevés, de nombreux projets bas carbone ont été reportés ou tout simplement annulés. Cela a eu un impact sur la totalité de la chaîne de valeur des CCS et sur la confiance.

De plus, la crise a entraîné un déclin du support de l'État aux innovations au profil de risques élevés, telles que les CCS. En 2011, le directeur de l'IEA, Richard Jones, mettait en garde : « *Chaque année qui passe rendra le déploiement plus compliqué (...), avec les mesures actuellement en place, les CCS auront du mal à se déployer* ». Les finances publiques en déficit rendent timide le soutien à l'action climatique. « *Nous assistons à un déclin du nombre de projets (CCS) suite au ralentissement de l'économie mondiale. La crise financière nous a fait perdre un temps considérable dans l'avancée du combat climatique* » déplorait Brad Page, directeur du Global CCS Institute (J. Watts, 2011).

Une partie importante du manque d'engagement de la part de l'Union européenne est directement liée à son économie. Nous pouvons voir sur la figure 22, représentant le support aux CCS en fonction du temps que le sommet, juste avant la perte du *momentum*, coïncide avec le début de la crise économique dont le monde a eu bien du mal à se remettre. Ainsi, les investissements importants à effectuer pour soutenir les CCS ont été réalloués à d'autres secteurs. La crise a causé la chute du prix du carbone compromettant les financements dépendants de l'ETS (voir 6.3). En s'effondrant, il causa aussi la remise en question du graphique en Figure 26, et c'est l'ensemble du *business case* qui fut contesté. De plus, la demande s'effondra et en particulier celle de l'énergie, provoquant alors une baisse naturelle des émissions et une perte d'intérêt pour le marché du carbone. Elle rendit aussi difficile l'accès aux

financements privés, les institutions financières étant, dans les années qui suivirent, en lutte pour leur propre survie.

Après la récession, les CCS sont restées en retrait alors que les investissements pour les ER reprenaient.

La crise de 2008 a eu un impact plus large encore. En 2009, la 15<sup>e</sup> Conférence des Parties eut lieu à Copenhague. Elle visait à négocier l'après-Kyoto. Le but était de proposer une nouvelle stratégie d'atténuation des CC qui commencerait à la fin du précédent programme, en 2012. La COP n'a pas réussi à atteindre un accord et est encore vue aujourd'hui comme un échec. Les États ne sont pas parvenus à s'entendre et à dépasser les difficultés de Kyoto. Plusieurs éléments ont eu un rôle important, mais la crise financière est certainement parmi les responsables du climat de tension qui régna sur le Sommet. Les différentes Parties estimaient que leur devoir premier était de redresser leurs économies. Le combat climatique n'était plus parmi les priorités. Cet échec a marqué la baisse d'ambitions environnementales et climatiques mondiales. L'élan de 2009 a donc été perdu et cela mit 6 ans pour le récupérer. Ce retard a fait perdre à l'économie mondiale environ 1 000 milliards d'USD.

L'une des discussions de la COP15 concernait la place des CCS dans les Mécanismes de Développement Propre (*Clean Development Mechanism*, CDM). Les CDM autorisent les pays industrialisés dans le cadre du Protocole à financer des réductions d'émissions dans les pays en développement et d'en bénéficier. Cette demande d'ajout créa beaucoup de discussions depuis la COP14. Selon l'Article 12 du Protocole de Kyoto, les CDM devaient contribuer à une croissance verte dans les pays hors Annexe 1. Or, les CCS ont pour vocation de neutraliser les émissions et non de contribuer à leur développement, il y avait là un désaccord quant à la mission de la technologie qui allait à l'encontre de la raison d'être des CDM. De plus, ce changement était encouragé par l'industrie du charbon, ce qui déplut aux Parties engagées sur la voie de la décarbonisation. La feuille de route de Bali impliquait que seules des technologies prouvées sans danger aucun pouvaient rentrer dans les CDM ; or ce n'était pas le cas des CCS.

*Le Global CCS Institute* soutenait que l'inclusion des CCS aux CDM aurait un impact positif sur leur développement en favorisant l'investissement. Lors de la COP16 en 2010, les Parties semblaient s'être mises d'accord pour inclure les CCS en posant des limites strictes sur leurs applications.

A posteriori, les CDM s'avèrent ne pas avoir contribué à supporter les CCS. Un seul projet dans un pays en développement, *In Salah* en Algérie, était opérationnel avant le changement et a dû être mis à l'arrêt peu de temps après, en 2011. En conclusion, le manque de vision commune et ambitieuse d'une action climatique mondiale a impacté le développement des CCS. La priorité des gouvernements a changé, passant du combat climatique au profit d'une reconstruction financière.

## 6.5. Quelles mesures supplémentaires auraient pu être prises ?

Au Canada et en Norvège, les mesures et les incitations financières des gouvernements ont joué un rôle important dans le développement des projets. La taxe CO<sub>2</sub> offshore et la régulation sur les émissions de centrales à charbon ont été décisives dans le développement des projets. Le Canada a été parmi les premiers pays à prendre une position forte en régulant les émissions des centrales au charbon. C'est ainsi que lancer une unité de CCS à *Boundary Dam* devint intéressant. Grâce aux subsides du gouvernement canadien (159 millions de CAD, 105 millions d'EUR) ainsi qu'aux revenus de la vente du CO<sub>2</sub> aux exploitants de gisements pétroliers, le coût important des CCS a pu être compensé.

Les législations encourageantes d'ordre climatique offrent un cadre intéressant au développement du captage et stockage du carbone. En effet, *Sleipner* et *Boundary Dam* sont tous deux issus de décisions stratégiques afin que leur exploitation soit conforme. Ceci montre l'importance de l'engagement des gouvernements dans le déploiement des CCS. Typiquement l'UE démontre une préférence pour les outils économiques souples au détriment des régulations strictes. Ces outils proposent une flexibilité qui semble plus adaptée à son marché.

Réguler les émissions de centrales électriques est, par contre, l'une des mesures les plus efficaces. En limitant les rejets dans l'atmosphère, cela obligerait les opérateurs à être conformes aux besoins climatiques. Cependant, de telles normes sont difficilement acceptées par les milieux visés. De plus, les gouvernements doivent s'assurer de la sécurité d'approvisionnement en électricité et ne disposent pas d'une liberté absolue quant à leurs ambitions.

Une taxe sur les émissions, quant à elle, est plus facilement acceptée, car elle présente plus flexibilité, qui est tant valorisée par le secteur CCS et énergétique. Elle peut jouer un rôle décisif dans le processus de décisions des opérateurs, comme cela a été le cas en Norvège où Statoil a pris l'initiative de lancer *Sleipner* après l'instauration de la taxe sur les émissions de CO<sub>2</sub> offshore.

Si l'EU ETS avait tenu ses promesses dès le début, il aurait pu faire concurrence aux normes et taxes. Cependant, il n'a pas pu être à la hauteur et les coûts qu'il imposait aux industries étaient négligeables. Émettre du carbone était presque gratuit et ne justifiait pas l'installation d'unités.

À Bruxelles et au sein de la Commission, la plupart des acteurs sont indifférents, voire hostiles, aux CCS. La technologie rencontre peu de succès, ce qui freine une approche ambitieuse de l'UE. Pourtant en voyant la feuille de route de l'énergie 2050, ces technologies sont considérées comme indispensables pour espérer arriver à décarboniser notre société dans les temps.

De nombreux auteurs et spécialistes proposent d'autres mesures que l'État pourrait prendre et qui ne seraient pas légiférées. En effet, le but d'un cadre législatif est de créer un climat de confiance. La régulation du secteur apporte une vision à long terme qui constitue une sorte d'assurance pour les

investisseurs. Les pouvoirs publics peuvent aussi jouer un rôle économique<sup>34</sup>. En fournissant les premiers financements, ils pourraient amorcer un mouvement en avant. *Oxburgh* proposait en 2016 que l'État établisse les premières infrastructures nécessaires au réseau à mettre en place. Celles-ci devraient ainsi développer une valeur économique suffisante pour entraîner un *momentum* et un climat propice à l'investissement privé avec l'intention que les pouvoirs publics puissent récupérer leur mise.

De nombreuses mesures proposées visent à démarrer, amorcer les investissements privés. Effectivement, lorsque le *pipeline* de projets s'agrandira, le coût des CCS sera amené à baisser. La collaboration internationale vise à organiser une politique commune. Le *Carbon Sequestration Leadership Forum* se réunit tous les deux ans par le biais des ministres de l'Énergie des pays membres. Ils mettent en avant les avancées en termes de support légal, institutionnel et financier et travaillent en collaboration avec le *Global CCS Institute* fondé par le G8. Ce dernier rassemble de nombreux acteurs directement et indirectement liés aux technologies. Il fournit des publications censées, d'une part, aider les décideurs à être mieux informés et, d'autre part, les orienter dans leur processus décisionnel. Ensemble, les différents acteurs devraient présenter un front commun afin d'harmoniser la structure dans laquelle les CCS pourraient se déployer. Le fait que même au sein de l'UE les réglementations soient morcelées impacte le climat de confiance à long terme. Dès lors, une collaboration internationale est cruciale.

Jusqu'à présent il semblerait que les mesures prises soient basées sur des études à répétition, imposant des délais monumentaux entre l'intention et la décision finale. La multiplication des analyses et rapports cause une perte de temps considérable. Le développement du cadre légal ayant déjà pris trop de retard, le temps devient déterminant. Les mesures une fois en place imposent des *deadlines* parfois intenable pour les projets, causant parfois leur annulation. La temporalité longue des CCS est souvent en désaccord avec les délais courts qui caractérisent le monde politique démocratique, de nombreux pays ont échoué à l'intégration du long terme dans leur vision du déploiement des CCS.

Ceci se ressent aussi dans le *design* des programmes de financement. Peu d'entre eux prévoient un accompagnement sur le long terme alors que la plupart visent un encouragement de la mise en place à court terme. Pourtant, les activités de stockage s'étalant sur plusieurs milliers d'années, elles auront vraisemblablement une longévité plus importante que la durée de vie de l'opérateur qui les gère. Les questions sur la responsabilité, la reprise des activités, la continuation du monitoring et la surveillance des sites d'injection méritent d'être étudiées. De véritables mesures d'accompagnement sont nécessaires afin de garantir le cycle de vie complet d'une unité CCS.

De plus, le caractère strict et prescriptif des législations limite fortement la flexibilité pourtant essentielle à une innovation technologique en phase de d'avant-projet. La sécurité de la population étant en jeu, l'État est dans l'obligation de veiller à ne rien laisser au hasard. Pourtant, ceci va à l'encontre des besoins des CCS qui nécessitent une souplesse et un soutien à toute épreuve.

---

<sup>34</sup> Voir chapitre 6.1.

## 6.6. Pourquoi de gros projets ont-ils été abandonnés ?

Les législations qui entourent une innovation telle que les CCS peuvent prendre de nombreuses formes et sont indispensables à la continuation du déploiement de la technologie. Une politique publique solide est cruciale au développement de technologies pionnières. Ainsi, en plus de l'absence d'initiatives, ce manque a amené l'annulation de 28 projets de grande envergure<sup>35</sup>. Voici plusieurs exemples sur différents continents illustrant les quelques difficultés rencontrées.

- Le projet *Zero Gen* en Australie devait intégrer une unité CCS sur une centrale de gazéification. Il était mené par une *joint-venture* entre l'État du Queensland, le *Commonwealth, Australian Coal Association's COAL21 Fund*, Shell et Mitsubishi Heavy Industries. Il aurait dû être opérationnel en 2015. La centrale devait, dans un premier temps, capter 65 % de ses émissions pour monter ensuite à 90 %, ce qui représentait 2 Mt de CO<sub>2</sub> par an. Le projet était considéré par le *Carbon Sequestration Leadership Forum* comme l'un des plus avancés de son époque. Cependant, lors de la seconde étude de faisabilité, plus approfondie, l'estimation des coûts a augmenté de 46 %, s'élevant désormais à 6,9 milliards d'AUD (4,4 milliards d'EUR) qui ne seraient pas couverts par les subsides publics. L'État du Queensland avait déjà investi 102 millions d'AUD sur le projet de recherche, en plus de l'état fédéral qui lui avait investi 92 millions. De plus, l'option de stockage préalablement retenue s'est avérée inapte à accueillir de si grandes quantités de CO<sub>2</sub> (IEA, 2016)<sup>2</sup>.
- En 2008, Shell avait prévu de lancer une unité de CCS aux Pays-Bas, à *Barendrecht*. Le CO<sub>2</sub> devait provenir d'une de leurs raffineries et être séquestré dans un gisement de gaz épuisé. 10 Mt de CO<sub>2</sub> devaient y être injectées en 25 ans. Le projet a essuyé une importante opposition des pouvoirs locaux. En 2010, le gouvernement néerlandais a décidé d'annuler le projet. Il a déclaré que l'opposition locale et le manque d'innovation technique le rendaient peu intéressant. Cet échec a démontré l'importance de l'implication de la communauté locale et environnante ainsi que toutes les parties prenantes dès les premières phases du projet. Cette expérience souligne la nette préférence des Européens pour le stockage offshore.
- *FutureGen 2.0* était un projet d'oxycombustion en Illinois en *retrofit* d'une centrale électrique au charbon. L'unité CCS devait permettre une séparation à hauteur de 90 %. De plus, elle disposerait d'un filtre à SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, mercure et particules fines. Il a été annulé en 2016 en majeure partie dû au retrait des subsides fédéraux qui devait s'élever à 1 milliard d'USD sur un coût total de 1,65 milliard d'USD (MIT, 2016). Le projet était soumis à l'*American Recovery and Reinvestment Act* de 2009 qui nécessitait qu'il soit opérationnel pour le 30 septembre 2015. Lorsque le département de l'énergie américain a estimé que celui-ci ne serait pas capable de respecter les délais, les subsides ont été retirés, malgré que le gouvernement ait montré son soutien à plusieurs reprises. Ceci montre un manque de flexibilité pourtant nécessaire à l'accompagnement d'une technologie naissante,

---

<sup>35</sup> La liste complète se trouve à l'annexe 8.9.

- Au Royaume-Uni, les efforts de la réforme du secteur énergétique et des mécanismes de financement n'ont pas pu contrebalancer l'abandon du fonds d'investissement. Le projet *White Rose* n'a jamais vu le jour. Il s'agissait d'une unité d'oxycombustion sur une centrale électrique au charbon. Elle aurait été la première au monde à utiliser cette technique. C'est en 2012 que *Capture Power Limited* en partenariat avec *National Grid Group* propose ce projet pilote. Il devait séquestrer 2 Mt de CO<sub>2</sub> par an vers un site offshore avec un rendement de 90 % du CO<sub>2</sub> émis. Ce projet affichait des coûts compétitifs et était en lice pour bénéficier de l'aide financière prévue par le gouvernement britannique. Les subsides ont cependant été annulés en dernière minute. Suite à cela, des investisseurs privés se sont aussi retirés du projet causant ainsi l'arrêt du développement.

Les décisions de retrait des financements montrent un contexte socio-économique peu favorable, tant au niveau commercial qu'au niveau politique, technique, social et économique. Pourtant, l'introduction d'incitations financières est indispensable pour soutenir les investissements privés dans le domaine du captage du carbone et ceci afin de créer un environnement favorable au développement de l'innovation. Même si les participations privées restent majoritaires, elles ne se font récemment que grâce à l'amorce du support publique.

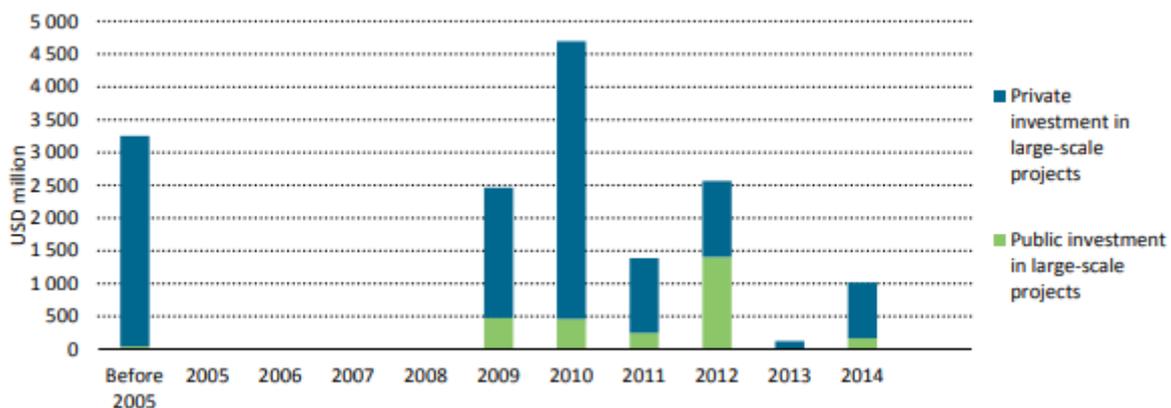


Figure 28 - Investissements publics et privés concernant des projets CCS

Source : IEA, 2016, 20 years of carbon capture and storage

Les problèmes principaux d'annulation concernent les projets de grande envergure. Parallèlement, une multitude de projets de taille inférieure se développent en Europe en Australie, en Chine, au Canada, en Corée, au Japon, etc. Ces projets d'étude contribuent à une meilleure compréhension et acceptation des CCS. En outre, ces petits projets sont plus expérimentaux et explorent de nombreuses techniques différentes pour la capture. Ils sont indispensables à l'amélioration des connaissances techniques, mais aussi pour rétablir leur réputation et surtout baisser les coûts. Cependant, le challenge actuel reste de passer les CCS à l'échelle commerciale suite au risque trop élevé pour les financements privés sans les aides publiques.

## 6.7. Où sont donc passés les financements publics ?

Bien souvent, les investissements publics agissent comme leviers pour débloquer des fonds privés. À peu près 12,3 milliards d'USD ont été collectés pour d'importants projets de CCS depuis 2005. Ces fonds proviennent principalement de programmes de participation aux États-Unis, au Canada, en Australie et en Europe. De ces 12 milliards, 77 % proviennent de sources privées. Ainsi, seulement 2,8 milliards d'USD d'argent public ont été alloués aux CCS entre 2007 et 2014, bien loin des 30 milliards initialement promis entre 2007 et 2010 par une grande partie de l'OCDE<sup>36</sup>. Ces fonds auraient dû permettre à 35 projets de grande envergure de voir le jour. Malheureusement, seulement 7 d'entre eux en ont bénéficié et l'entièreté de ceux-ci se trouve aux États-Unis et au Canada. Différentes raisons y sont imputables, toutes sont aussi complexes les unes que les autres.

L'une d'entre elles est le manque de **flexibilité** des programmes publics. En effet, les agendas de financements sont souvent stricts et ne peuvent être assouplis, limitant alors leur accès. Le manque de flexibilité des autorités a déjà été mis en avant dans ce travail. Les projets qui veulent prétendre à des subsides doivent se plier aux règles d'éligibilité concernant notamment les délais de développement ainsi que les caractéristiques financières. Pour qu'un projet soit éligible, il est dans l'obligation d'adapter son cahier de charge sans tenir compte de ses besoins commerciaux ou technologiques. Ceci fut le cas de *FutureGen 2.0*<sup>37</sup> qui s'est efforcé de respecter les critères établis et puis s'est vu dans l'incapacité de répondre aux délais demandés. Les subsides, devant compter pour plus de la moitié de son coût total, ont alors été supprimés. Les règles dictées par ce genre de programmes montrent un important décalage avec les besoins de flexibilité d'une technologie pionnière.

Le manque de **vue d'ensemble** causée par les exigences des programmes de financement cause aussi un décalage. Un projet CCS est composé de trois étapes qui ne peuvent être traitées de manière isolée, la capture, le transport et le stockage. Si les programmes ne concernent que l'une ou l'autre étape, les autres sont parfois négligées. C'est ce qui s'est passé en Australie avec le projet *Zero Gen*, lorsque des problèmes se sont présentés avec l'identification d'un puits qui ne convenait pas à la quantité de CO<sub>2</sub> séparée. L'étape de stockage a été délaissée et le projet fut abandonné par manque d'intégration des différentes étapes.

Une troisième cause potentielle est le **manque de suivi opérationnel**. Pour des projets de cette envergure, le support nécessaire ne s'arrête pas toujours aux besoins en capital pendant le lancement. Un soutien financier sur la longueur du projet peut s'avérer extrêmement bénéfique, que ce soit sous la forme de mécanisme ciblé ou simplement d'un prix du carbone. Ainsi, avoir un signal prix tout au long de la phase opérationnelle aiderait à soutenir le projet sur le long terme – les CCS se planifiant sur le long terme. Si la phase de lancement est critique, elle n'est pas l'unique défi de leur cycle de vie.

---

<sup>36</sup> Voir chapitre 5.2.

<sup>37</sup> Mentionné dans la partie précédente.

Une quatrième raison peut être le **manque d'infrastructures** permettant le transport et le stockage du CO<sub>2</sub>. Aux États-Unis et au Canada, un vaste réseau de *pipelines* destiné au CO<sub>2</sub> existe grâce aux projets d'EOR. Ceux-ci sont inexistantes ou presque en Europe. Tout nouveau projet opérant en dehors de ce réseau préétabli doit tenir compte de l'investissement supplémentaire nécessaire à la construction de ces infrastructures. Ceci vaut aussi pour une plateforme de stockage. Si celle-ci existe, elle est à même d'accueillir le CO<sub>2</sub> de plusieurs unités de capture, à l'inverse, s'il faut la créer, c'est un financement qui devra être supporté par la première unité à voir le jour. L'*UK Oxburgh Report* de 2016 propose que l'État s'engage pour ces installations par le biais d'entreprises publiques, puis privatisées dans un second temps.

Enfin, un décalage important est ressenti entre les **échelles temporelles**. Les CCS opèrent de long à très long terme et les programmes de financement public, généralement à court et à moyen terme, ce qui empêche souvent de pouvoir allier efficacement les deux. Cependant, les projets qui ont effectivement bénéficié de ces subsides démontrent que cela n'est pas impossible.

En Europe, le fond *NER300* avait été monté dans l'idée de financer les technologies innovantes bas carbone. Sa participation à des projets de grande envergure CCS ou d'énergie renouvelable en faisait un catalyseur pour le déploiement de ces innovations au sein de l'Union européenne. Instauré en 2008, le fond se distinguait dans son élaboration. En effet, plutôt que de bénéficier d'allocations directes de l'argent public, celui-ci a reçu des quotas d'émissions du marché européen ETS. Normalement, en vendant ces quotas au prix envisagé de 30 €/t de CO<sub>2</sub>, il devait atteindre une capitalisation de 9 milliards d'EUR. Ce montant en aurait fait le plus gros fonds d'accompagnement au monde et aurait été suffisant pour redistribuer aux projets CCS ambitieux qui postulaient pour une aide publique. Cependant, fin 2012, alors que les aides auraient dû être allouées, seulement 1,2 milliard d'EUR ont pu être levés. En cause, l'écroulement du prix de la tonne de CO<sub>2</sub> sur le marché, qui devait être la source de revenus du fond. Ainsi, seul un projet de CCS a pu bénéficier du financement. Celui-ci, mené par Arcelor Mittal, fut ensuite annulé, lui aussi, pour cause de difficultés techniques. Seuls quelques projets d'énergies renouvelables ont pu être subsidiés. Ainsi, la pièce maîtresse de la stratégie européenne pour le déploiement des CCS au sein de l'Union a été un échec retentissant.

La chute du prix du carbone n'est pas la seule responsable. Les institutions européennes ont réagi trop lentement alors que la rapidité était essentielle. En effet, elles ont mis quatre ans à finaliser le programme : deux ans pour le mettre en place et deux ans pour la sélection des bénéficiaires. Les gouvernements des EM n'ont pas su honorer les délais qui leur avaient été imposés. Seule la France avait sélectionné le projet d'Arcelor-Mittal qui a dû être retiré en dernière minute (ENGO network on CCS, 2013). Ceci montre une fois de plus le manque d'engagement franc et de flexibilité des autorités publiques.

## 6.8. Les technologies CCS sont-elles viables ?

À nouveau, les analyses a posteriori, capables de rendre compte des différents points bloquants technologiques sont bien différentes des analyses « **en temps réel** » qui ne le permettent pas. En effet, sans avoir le recul nécessaire, il est complexe d'estimer la viabilité de la technologie disponible dans les années 2000 vu son faible développement à l'échelle commerciale. D'une part, certains projets déjà mis en place à ce moment-là démontraient la viabilité, d'autre part les risques, les incertitudes et le coût élevé semblaient invoquer l'inverse. Ainsi ces aspects ont joué un rôle complémentaire les uns envers les autres et ont ralenti le déploiement des CCS.

Les usines pilotes auraient dû servir de pionnières. Elles auraient pu ouvrir la voie à une compétition naissante, à un retour d'expérience technologique, à de meilleures connaissances des risques et des impacts potentiels et surtout à une baisse des coûts énergétiques et financiers. Cependant, le manque de législation ciblée et efficace n'a pas pu agir comme soutien pour accélérer le déploiement des CCS.

Pour être plus compétitive sur le plan technique et économique, chaque technologie doit également améliorer ses performances spécifiques.

- *Postcombustion* : aujourd'hui la plus répandue commercialement, elle nécessite une amélioration des performances des agents de séparation (solvants, membranes) en termes de stabilité, sélectivité et capacité de régénération, mais aussi de coûts. Ce perfectionnement permettrait de limiter la lourdeur de l'étape de capture et d'augmenter l'attractivité du *business case*.
- *Oxycombustion* : la maîtrise du procédé de *Chemical Looping Combustion* est importante. Les performances du brûleur ou de la chambre de combustion doivent permettre de propulser le procédé au-devant de la scène des CCS dans l'industrie. La recherche d'agents de transfert de l'oxygène efficaces tels que les oxydes métalliques est aussi cruciale pour diminuer les coûts opérationnels tout au long de la durée de vie de l'unité.
- *Précombustion* : la mise au point de turbines à hydrogène de grande taille est nécessaire pour la propagation commerciale du procédé. Par contre, cette technologie n'est pas disponible au *retrofit* et ne correspond donc pas à l'adaptation du parc existant.
- *Développement de l'identification de puits de stockage de CO<sub>2</sub>* : il est indispensable au déploiement. L'étape de stockage présente la majeure partie des risques. Le fait qu'il n'existe pas encore de moyen de garantir la sécurité du site sur le très long terme rend difficile la défense de ces technologies. Une amélioration du procédé de sélection et une continuation des recherches intensives permettront de diminuer les risques rapidement.
- L'intensification des recherches, mais aussi les avancées majeures récentes en matière de mesure et de monitoring des puits de carbone ont permis d'augmenter la confiance dans la capacité des CCS à délivrer un stockage longue durée de manière sûre. C'est une tendance qui doit se poursuivre si les CCS espèrent avoir une chance de se déployer à temps pour tenter de maintenir les températures sous la barre des 2 °C d'augmentation.

Le World Economic Forum calculait en 2015 que si toutes les centrales au charbon actuellement opérationnelles continuaient leurs activités jusqu'en fin de vie prévue, elles émettraient entre 260 et 350 Gt de CO<sub>2</sub> d'ici 2050. Cela augmenterait la concentration du dioxyde de carbone de 13-18 ppm. Le charbon consommerait donc 30 à 40 % du « budget carbone » restant, situé à une concentration approximative entre 430 et 480 ppm.

Étant donné que le charbon restera longtemps dans le mix énergétique, nous sommes en droit de nous demander si les CCS ne sont pas indispensables au respect des engagements pris à Paris. Pourtant, s'il reste aussi répandu et principalement dans les économies en développement, c'est pour son abondance et son faible prix. Si des unités CCS, si chères à l'heure actuelle, doivent être installées sur toutes les plus grosses centrales, ne serait-il pas plus avantageux et surtout moins coûteux pour ces pays de directement se diriger vers un déploiement des énergies renouvelables ?

Le coût énergétique supplémentaire nécessaire au fonctionnement des CCS est aujourd'hui encore trop élevé et non compétitif d'où l'urgence de le baisser. Le carburant essentiellement dicte le prix de l'électricité pour les ménages en plus du coût d'investissement des installations et des taxes. Si celui-ci est élevé, cela produira une électricité trop coûteuse pour beaucoup de régions du monde. La précarité énergétique est un des défis principaux de notre époque.

Les CCS sont aussi intéressantes pour l'industrie lourde telle que le ciment ou la sidérurgie. Malgré que les différentes organisations semblent s'accorder sur leur potentiel, la littérature ne s'en préoccupe que peu. De nombreux scientifiques s'insurgent contre l'idée d'impliquer les CCS sur des centrales électriques, car d'autres options moins chères existent. Mais qu'en est-il des procédés industriels nécessitant un changement de la structure moléculaire pour lesquels il n'existe aucun substitut à l'heure actuelle ?

L'industrie est responsable de plus de 20 % des émissions de CO<sub>2</sub>éq. Dans les scénarios climatiques futurs, son poids devrait même augmenter. Même si son efficacité énergétique a subi récemment de grandes transformations, la démographie, s'accroissant sans cesse, l'urbanisation et le développement des économies en transition causent une demande et une production en augmentation. Alors quelles sont les solutions ? Premièrement, continuer les travaux sur l'amélioration de l'efficacité énergétique en gardant à l'esprit les limites physiques de la thermodynamique qui limitera les progrès réalisés. Deuxièmement, évoluer vers l'utilisation de l'électricité, étudier le potentiel des fours à arcs électriques plutôt que ceux directement alimentés par des EF, avec le risque d'augmenter la demande en électricité qui ne pourrait plus être couverte par des sources sobres en carbone. Et troisièmement, implanter rapidement les CCS sur les plus grosses unités de production lorsque les émissions restent trop élevées. Ces différentes initiatives devront être lancées en parallèle si le secteur industriel veut arriver à diminuer son impact climatique.

Shell a tenté de reprendre ces hypothèses dans un scénario appelé SKY afin de modéliser le potentiel de décarbonisation. Il faut à nouveau mettre en avant le rôle du soutien public en créant un cadre légal

adéquat, en encourageant la recherche permettant de baisser les coûts et surtout en organisant un marché du carbone tenant la route et dont le prix refléterait le coût réel à long terme de l'émission d'une tonne de carbone supplémentaire. Ceci ferait des CCS une option à considérer dans le cadre d'une politique climatique ambitieuse. (D. Hone, 2018)

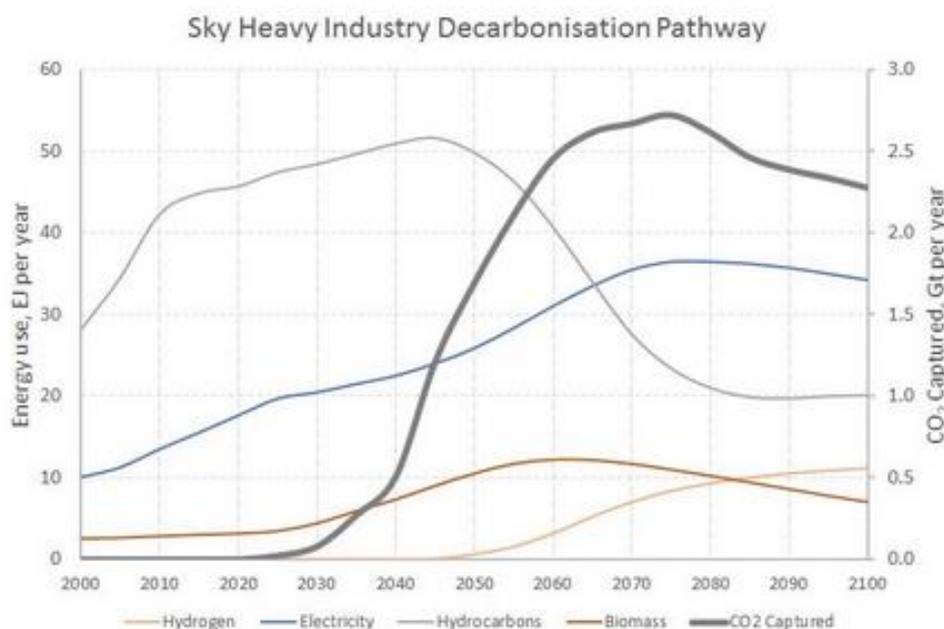


Figure 29 - Scénario de décarbonisation de l'industrie SKY

Source : D. Hone 2018

### 6.9. Les CCS sont-elles à la hauteur de nos attentes ?

Les engagements pris à Paris imposent de rester sous la barre des 2 °C. Le scénario de l'IEA 2DS tente de modéliser les actions à mettre en place afin de respecter cet objectif. Dans ce scénario, il y a 50 % de chance que la température n'augmente pas au-delà de cette limite. De plus, les émissions de CO<sub>2</sub> diminuent de 60 % en 2050 par rapport aux niveaux de 2013. Il prévoit que le déclin des émissions se poursuive jusqu'à arriver à des émissions négatives dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Les changements à effectuer dans le secteur énergétique sont calculés pour être les plus rentables en fonction de la faisabilité. Le poids de chaque technologie envisagée, que ce soit l'efficacité énergétique, le nucléaire ou les CCS, est calculé en fonction du coût marginal minimal de leur mise en place.

Ce scénario considère que d'ici à 2050, les CCS seront responsables de 12 % de la réduction des émissions, avec 94 Gt de CO<sub>2</sub> capté de sources fossiles et 14 Gt provenant de sources biomasse et biofuel générant ainsi des émissions négatives. En 2050, il faudrait arriver à capter et séquestrer plus de 6 Gt par an pour arriver à seulement 12 % des réductions. Le graphique ci-dessous illustre la provenance du CO<sub>2</sub> capté.

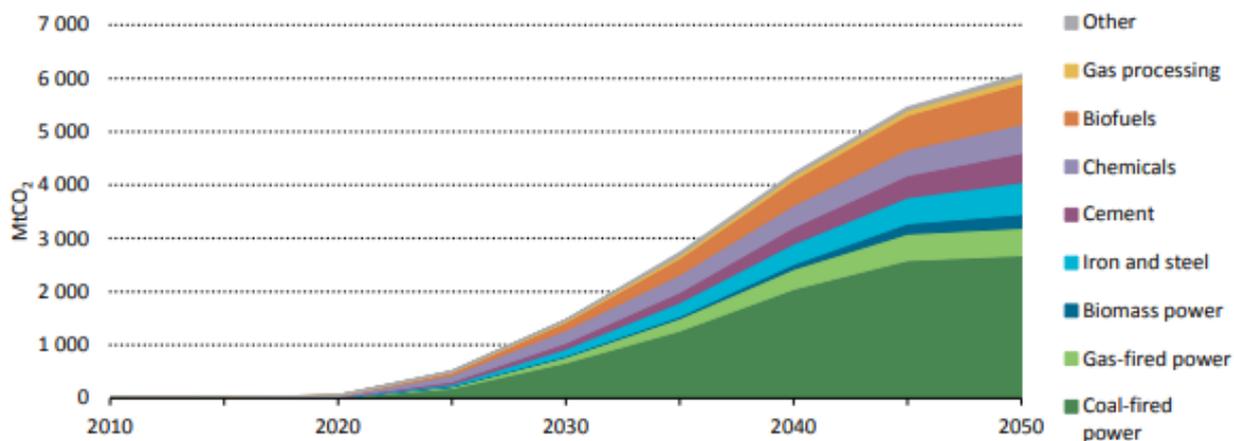


Figure 30 - Source des réductions d'émission grâce aux CCS

Source : IEA, 2016, 20 years of carbon capture and storage

L'IEA a dû revoir ses espérances à la baisse. Le scénario BLUE MAP, plus ancien, considérait la contribution des CCS à hauteur de 19 % de la réduction totale, avec une centaine de projets opérationnels en 2020, bien loin de la réalité de 2018. Alors que s'est-il passé ? De nombreux projets pilotes devaient contribuer à l'amélioration des performances et des connaissances disponibles. Nombre d'entre eux ont dû être annulés. Ainsi, il est presque impossible que nous arrivions à cet objectif et donc que nous puissions compter sur l'expérience que cela nous aurait apportée. Face à ce constat, l'IEA a été forcée de revoir à la baisse ses estimations.

En observant le graphique ci-dessus datant de 2016, nous sommes en droit de mettre en doute notre capacité à être aussi efficaces en 30 ans alors que les performances depuis Sleipner, en 20 ans ont été proches du néant. Nous pouvons par contre espérer que l'avenir des CCS soit un cercle vertueux. Un cadre légal amélioré dans un climat mondial de lutte contre les CC ambitieux, couplé à un prix du carbone en hausse, semblent être les premières étapes nécessaires. Dans un second temps, les projets qui auront été lancés grâce à ces premières mesures apporteront expérience et connaissances nécessaires à la poursuite de l'amélioration des performances. Celles-ci seront essentielles au lancement d'unités de très grande envergure.

Les CCS sont fort appréciées des politiciens et du secteur des énergies fossiles, car elles limitent le besoin de transition de notre système énergétique. Face à la croyance des énergies fossiles sans impact climatique, de nombreuses associations environnementales s'insurgent. En effet, le but des CCS était bien différent : plutôt que permettre de continuer l'exploitation des EF, elles avaient la mission de neutraliser celles qui resteraient dans le mix énergétique par obligation.

Outre les prévisions des scénarios de l'IEA, plusieurs reconsidérations ont également eu lieu au niveau technique. Les CCS ont besoin d'énergie<sup>38</sup>, tant pour leur fonctionnement, la compression, la régénération des solvants ou encore la séparation du comburant ou carburant. Cette énergie provient

<sup>38</sup> Voir figure 10.

vraisemblablement de la centrale en question, s'il s'agit d'une unité de production d'électricité. C'est ce qu'on appelle des **boucles de rétroaction**. Cette énergie a une empreinte carbone non négligeable. L'impact a pourtant été souvent sous-estimé dans les études du début des années 2000. Ainsi, pour une unité capturant 90 % des émissions de la centrale à laquelle elle se rapporte, en causant une baisse de rendement de 30 %, le potentiel de capture est nettement réduit (World Economic Forum, 2015).

De plus, le *retrofit*, soit l'adaptation de centrales électriques existantes, s'est avéré plus difficile que prévu. D'une part, car elles n'étaient pas conçues pour accueillir une unité de CCS en plus sur leurs installations et d'autre part, car cela réduisait drastiquement le choix des technologies applicables, seule la postcombustion semble adaptée. La *CCS Association* suggérait en 2006 d'imposer aux nouvelles centrales aux EF de prévoir une adaptation prochaine. Mais cela ne cause-t-il pas un délai supplémentaire dans la réduction des émissions ?

## 7. Conclusion

### 7.1. Réponse à la question de recherche

Le but de ce travail était de comprendre les technologies de capture et de stockage du carbone afin de mieux cerner la ou les causes de leur échec de déploiement. Nous nous sommes intéressés au sujet avec l'idée de comprendre le potentiel des CCS en termes de réduction des émissions dans un climat d'urgence post-Paris. La recherche bibliographique qui a servi de base à la rédaction a enrichi nos connaissances en matière de développement des innovations. L'importance des actants agissant sur ce processus nous a ouvert les yeux sur la multitude de facteurs à prendre en compte. La théorie de l'acteur-réseau nous a permis de poser un cadre sur cette démarche.

Avant d'approfondir l'étude des documents, nous avons pensé à limiter la recherche aux aspects financiers relatifs aux CCS. Mais il est bien vite apparu que ceux-ci avaient été inconsistants au long du développement de ces technologies. C'est ainsi que la notion d'échec est devenue plus claire. Nous nous sommes donc intéressés à leur évolution, ou plus exactement à leur manque d'évolution durant ces dernières décennies. Nous avons été intrigués par la différence entre l'ambition du début des années 2000 et la réalité de 2017, et c'est pourquoi nous avons choisi de réaliser une étude multidimensionnelle, recherchant les raisons de ce faible déploiement.

L'élaboration de ce travail nous a permis de mieux appréhender la nature complexe des CCS. L'intérêt porté aux dimensions financières, environnementales, légales, etc. nous a aidés à la mise en contexte de l'innovation. L'identification des quelques acteurs/actants principaux a contribué à une meilleure compréhension du contexte socio-économique dont l'évolution a dicté la direction prise par les CCS.

La recherche du contexte historique a mis en avant de nombreux aspects caractérisant l'échec de déploiement des technologies. Celui-ci trouve sa cause dans une multitude d'aspects entremêlés qu'il est extrêmement complexe d'isoler. Ceci représente une des difficultés majeures rencontrées dans ce mémoire. Le cadre théorique basé sur le modèle de l'intéressement met en avant cette imbrication

simultanée causes. Les allers-retours entre actants, les jeux d'influence entre porte-paroles et les boucles de rétroaction sont quelques exemples des complexités liées aux innovations « *in the making* ». Ainsi, en accord avec l'ANT, ni une ligne du temps ni une séparation entre les différentes dimensions financières, sociales et légales ne sont capables d'expliquer cet enchevêtrement. En divisant la question de recherche en sous-points, cela nous a offert la possibilité de comprendre sous un angle différent les aspects potentiels ayant pu avoir un impact.

En se penchant sur le chapitre 6, le lecteur a pu apercevoir à quel point les différents événements se sont influencés mutuellement pour donner lieu à la situation telle qu'elle est aujourd'hui. Alors **pourquoi les technologies CCS ne se sont-elles pas assez développées** ? Ces technologies présentent une structure de coûts complexe, mais surtout élevée. Leur installation demande de lourds investissements qui sont suivis, tout au long de la période de capture, de coûts opérationnels tout aussi importants. De plus, étant donné qu'il n'y a pas ou peu de marché pour le CO<sub>2</sub> séparé, ces technologies représentent un coût net. Ces caractéristiques financières ont influencé le besoin en subsides et la nécessité d'avoir un prix du carbone soutenu.

De nombreuses raisons ont limité la probabilité de voir l'un et l'autre se réaliser. La crise financière et la réallocation des budgets disponibles en subsides couplées au manque d'ambition climatique mondiale ont probablement été déterminantes. De plus, l'absence d'un signal prix robuste pour le carbone a pesé lourd dans les calculs de rentabilité. En Europe, c'est l'EU ETS qui est chargée de supporter le rôle du signal prix. Que ce soit pour des raisons de mauvais *design* ou à cause de la baisse de production, le faible montant des quotas n'a pas su influencer les investissements verts.

En parallèle, la confiance des investisseurs privés restait faible, d'une part à cause des incertitudes techniques mises en avant par certains organismes et d'autre part par manque de cadre légal. Le vide juridique entourant les CCS traduisait l'absence de vision à long terme de la part des autorités. Pourtant, pour lancer un projet d'une telle amplitude, les opérateurs énergétiques et autres doivent se sentir accompagnés. Afin que leur investissement ait du sens, il faut un déclencheur. Celui-ci peut prendre la forme d'une norme d'émission ou d'une taxe sur le CO<sub>2</sub>, mais aussi d'un subside permettant de diminuer le poids de l'investissement ou du moins le coût du capital nécessaire.

Énormément d'argent a déjà été mobilisé puis perdu à la suite des annulations de projets. Beaucoup d'espoirs, de désillusions et de frustration ont marqué l'histoire des CCS en Europe. D'abord labélisées comme indispensables, elles ont subi plusieurs revers avec les retraits de financements, malgré que des organismes tels que le GIEC restent aujourd'hui sûrs que si les CCS ne sont pas mis en place, il sera pratiquement impossible de maintenir l'augmentation des températures sous les 2 °C. D'autres pays, comme le Canada ou les États-Unis, n'ont pas connu les mêmes difficultés que l'Europe. Le contexte dans lequel ils ont développé les CCS était différent sur de nombreux points. Les activités d'EOR étaient l'une des principales différences, elles permettaient une utilisation du CO<sub>2</sub> réduisant la perte, allant même jusqu'à les rendre parfois rentables. Le cadre légal était aussi bien différent, encourageant le développement de l'innovation d'une autre manière.

Pour finir ce point, il nous semble pertinent de discuter de l'utilisation du mot « échec ». Il avait été choisi au début de la démarche afin de référer au déploiement qui s'est déroulé plus lentement qu'il ne l'aurait dû, au vu des prévisions qui avaient été faites, mais aussi de l'urgence climatique. Par conséquent, ce terme reflétait une prise de position en faveur des CCS qui n'était pas intentionnelle. Ce mémoire se veut neutre, et centré sur les faits. Il apparaît donc a posteriori que ce terme ne soit pas optimal et aurait probablement dû être reconsidéré, éventuellement au profit de « ralentissement » ou « revers ».

## 7.2. Futur des CCS

L'accord de Paris marque un tournant historique dans l'histoire de la stratégie mondiale contre les changements climatiques. Le sens de l'urgence s'est accentué. Le nouveau contexte dans lequel nous nous trouvons est bien différent de celui post-Copenhague. Ce mémoire s'est penché sur le passé, mais nous sommes en droit de nous demander de ce qu'il adviendra des CCS dans le futur. Quelle sera la place de ces technologies dans le mix des mesures d'atténuation ?

Il y a actuellement beaucoup de discussions sur les prochaines étapes qui lui sont réservées. Que ce soit par ses partisans ou ses détracteurs, de nombreux jeux d'influence et de pouvoir agiront sur leur avenir.

La place des CCS dans le mix énergétique futur n'est pas assurée, car les subsides aux énergies fossiles sont appelés à disparaître, si pas maintenant, très prochainement. Le charbon deviendra probablement rapidement plus cher que les énergies renouvelables, dont le coût ne fait que diminuer. En rajoutant des unités CCS aux centrales, cela augmenterait la facture d'électricité des citoyens au risque d'affecter la précarité énergétique. De plus, les aides servant à renforcer le *carbon lock in* sont de plus en plus stigmatisées. Nous remarquons un appel grandissant de la population à un arrêt des subsides aux EF en faveur d'une transition radicale de nos systèmes énergétiques. Le meilleur CO<sub>2</sub> n'est-il pas celui qui n'est pas émis ?

À l'opposé, les CCS sont à nouveau reconsidérés à la suite de l'urgence climatique qui a gagné en crédibilité ces dernières années. L'Accord de Paris engage les Parties signataires sur la route de la décarbonisation en exigeant des émissions totales négatives lors de la deuxième moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Peu de technologies connues à l'heure actuelle permettront d'y arriver. Pourtant, les CCS couplées à la bioénergie auraient la capacité de présenter un bilan carbone total négatif. Ceci démontre que pour beaucoup d'acteurs, ces technologies doivent continuer à se développer. Parallèlement aux entreprises, les laboratoires de recherche travaillent d'arrache-pied pour mettre en place des techniques innovantes potentiellement capables de réduire le coût énergétique et financier. Que ce soit l'utilisation de nanoéponge à carbone ou la transformation du CO<sub>2</sub> en roche grâce au substrat magmatique, les projets de recherche se multiplient afin de baisser les coûts au plus vite (JWNenergy, 2017).

Tant pour diminuer l'empreinte de l'industrie lourde que pour produire des émissions négatives, les CCS offrent un potentiel qui n'est aujourd'hui proposé par aucune autre technologie. Avec des procédés connus et des barrières identifiées, tout porte à croire que le climat d'action actuel renforcera le rythme

de lancements des différentes unités. En février 2018, l'UE a lancé un nouvel essai de financement des CCS. Un autre fond sera lancé pour 2021, celui-ci sera le successeur du *NER300* et sera construit sur les mêmes bases. John Scowcroft du *Global CCS Institute* reconnaît toutefois les nombreux avancements de *l'Innovation Fund* par rapport à son prédécesseur. Une fois de plus, le montant dépendra de la vente des quotas sur le marché. L'EU ETS est aussi en révision afin d'appréhender sa prochaine phase de fonctionnement avec l'intention de ne pas réitérer les échecs du *NER300* (P. Teffer, 2018).

La Chine est le plus gros émetteur de dioxyde de carbone et possède la moitié des centrales électriques au charbon du monde sur son territoire. Deux tiers de sa flotte a moins de 15 ans et pourrait rester opérationnelle pendant encore 30 ou 40 ans. En 2015, elle annonçait son intérêt grandissant pour ces technologies par le biais de la publication d'une feuille de route CCS. Leur collaboration avec les États-Unis laisse espérer que le partage d'informations permettra une baisse phénoménale des prix en un temps record, comme cela s'est passé avec les ER. Le *retrofit* des centrales chinoises au charbon semble être une ambition grandissante avec, à l'heure actuelle, cinq projets en phase de d'avant-projet<sup>39</sup> (IEA, 2016).

Dans ses modélisations, le MIT avait considéré que l'évolution des CCS serait lente jusqu'en 2030, puis, qu'elle exploserait entre 2030 et 2050. Selon l'institut, les différents marchés du carbone convergeraient pour afficher un prix universel et élevé, rendant économiquement aberrante toute émission sans traitement. Ces prévisions semblent indiquer la nécessité de la mise en place de cadres légaux adaptés, de marchés du carbone performants, de technologie à la pointe, etc. avant que la technologie ne puisse se répandre à grande vitesse. Si ces prévisions s'avéraient correctes, alors les revers essuyés par les technologies au cours de ces 20 dernières années auraient un rôle formateur et ne devraient en aucun cas être considérés « d'échecs ».

La dimension financière est, elle aussi, largement étudiée. Afin d'alléger le *business case* des CCS, les différents acteurs tentent de trouver des utilisations<sup>40</sup>. Il existe de nombreux marchés potentiels pour le CO<sub>2</sub> séparé, comme la production d'urée, l'industrie pharmaceutique ou encore l'alimentaire qui présentent un certain potentiel à long terme, mais vraisemblablement en quantités marginales. Ces usages restent actuellement hors de portée, dû aux barrières techniques. Cependant, à l'inverse du stockage, elles ne permettent pas de retourner le carbone dans le cycle long de sédimentation, mais plutôt de le garder dans le cycle court hors atmosphère. D'autres fonctions sont en cours de développement notamment dans le durcissement du béton qui pourrait offrir une opportunité de séquestration à moyen terme. En outre, il est aujourd'hui possible de produire de nouveaux carburants lorsque le CO<sub>2</sub> capturé est ajouté à de l'eau, l'hydrogène se liant au carbone. Ce mélange forme alors des hydrocarbures pouvant être consommés à leur tour, permettant ainsi à la réaction de n'émettre que de l'oxygène. Ceci représente une manière de stocker l'énergie sans devoir passer par une batterie. Ce

---

<sup>39</sup> Voir Annexe 8.3.

<sup>40</sup> Voir exemples décrits à l'Annexe 8.5.

procédé est toujours au stade de développement, mais présenterait de nombreux avantages qui lui valent le soutien des plus grandes institutions (W. Chanmanee, 2016).

Pour les décennies à venir, l'espoir de la capture de carbone provient d'une autre branche de la géo-ingénierie<sup>41</sup>. Similaire aux CCS dans son principe, mais différente dans ses techniques, la capture du CO<sub>2</sub> directement dans l'air semble révolutionnaire. Les CCS étudiées dans ce mémoire concernent la capture en source ponctuelle, lorsqu'un gaz de combustion offre une concentration en CO<sub>2</sub> suffisante. L'absorption directe est bien différente. En effet, la concentration du dioxyde de carbone s'élevant en juin 2018 à 410 ppm, les techniques décrites au point 4.2 ne peuvent pas être appliquées, car la concentration est à peu près 300 fois plus faible.

Il existe alors plusieurs possibilités. La plus évidente est la reforestation massive qui permettrait d'arriver à d'excellents résultats, et cela de manière simple. Les seuls risques connus sont les feux de forêt dont la fréquence est appelée à augmenter avec le réchauffement climatique. Cependant, les arbres mettent de nombreuses années avant d'arriver à maturité et donc d'optimiser le taux d'absorption, la surface nécessaire serait gigantesque et limiterait l'accès aux terres agricoles. De plus, cela n'apporte pas de réponse au découplage des cycles du carbone, long et court, car ce dernier resterait dans le cycle biologique à l'inverse du stockage décrit dans ce document.

Une seconde option serait l'utilisation d'un système de filtration de l'air ambiant. Certaines entreprises comme CarbonEngineering ou Climeworks ont développé leur propre prototype. Il s'agit de faire passer l'air dans une sorte de ventilateur dont l'intérieur est rempli d'une substance qui se lie au CO<sub>2</sub> lorsqu'ils rentrent en contact. De la même manière que pour la postcombustion, le solvant est ensuite régénéré pour isoler le gaz carbonique. Ces turbines permettent d'arriver à un rendement de 80 % de séparation. Ce gaz étant un polluant global, les unités peuvent se situer partout dans le monde sans que cela influe sur les performances. L'intérêt est d'autant plus grand que les unités peuvent être combinées. En plaçant une combinaison sur un emplacement désertique, la surface occupée n'interférera ni avec la production de nourriture, ni avec l'industrie ou les surfaces habitables. De plus, elles sont mobiles et peuvent être déplacées afin de produire des synergies avec d'autres installations. En Suisse, Climeworks a placé son prototype entre un incinérateur et une serre : le premier fournit l'énergie et la chaleur nécessaire au fonctionnement et le deuxième récupère le CO<sub>2</sub> pour la culture de légumes, le surplus en carbone permettant d'augmenter les rendements de 20 à 30 %.

---

<sup>41</sup> Il s'agit de l'ensemble des techniques visant à manipuler et modifier le climat et l'environnement de la Terre afin de le corriger et d'éviter le réchauffement climatique.



Figure 31 - Modules de capture par Carbon Engineering

Source : <http://carbonengineering.com>

D'autres options sont aujourd'hui à l'étude, telles que les microalgues. Ces dernières présentent un énorme potentiel, elles permettent par exemple la production de biocarburant de manière nettement plus efficace que les cultures agricoles actuelles du fait de leur structure chimique. Elles sont aussi gourmandes en CO<sub>2</sub> et s'en servent pour se développer de manière presque exponentielle. Elles peuvent servir pour d'autres utilisations telles que les bioplastiques ou l'industrie chimique. Cependant, elles présentent encore beaucoup de freins comme la demande élevée en eau et en surface, une faible productivité qui mène à une rentabilité faible, etc. Le projet européen *ALGADISK* se penche depuis quelques années sur le développement de cette technique grâce au fonds de support *Seventh Framework Programme*.

L'humanité n'abandonne pas l'espoir de pouvoir capter le CO<sub>2</sub> émis par l'homme, que ce soit avant son émission, pour éviter de l'émettre ou bien après son émission. Les recherches se multiplient face à la barrière de viabilité économique. Tant pour les CCS que pour d'autres techniques, de nombreux acteurs croient encore en notre capacité à maîtriser l'augmentation des températures voire à inverser la tendance. Les nouvelles générations devront redoubler d'efforts pour ne pas atteindre un point de non-retour.



Figure 32 - Capturer nos émissions

Source : *The Economist*  
Belle Mellor, 2009

## 8. Bibliographie

Akrich Madeleine, Callon Michel, Latour Bruno, 2002, **The Key To Success In Innovation Part I: The Art Of Interessement**, *Centre De Sociologie De l'Innovation 60 Boulevard Saint-Michel, Ecole des Mines de Paris, 75272 Paris, International Journal of Innovation Management Vol. 6, No. 2 (June 2002) pp. 187–206*

Akrich Madeleine, Callon Michel, Latour Bruno, 1988, **A quoi tient le succès des innovations ? 1 : L'art de l'intéressement; 2 : Le choix des porte-parole. Gérer et Comprendre**. *Annales des Mines, Les Annales des Mines, 1988, pp.4-17*

Australia House of Representatives Standing Committee on Science and Innovation, 2007, **Between a rock and a hard place, The science of geosequestration**, *The Parliament of the Commonwealth of Australia*, August 2007, Canberra

Baeza Ramón, Balagopal Balu, Boudier Eric, Buffet Michael, Velken Ingrid, 2008, **Carbon Capture and Storage A Solution to the Problem of Carbon Emissions**, *The Boston Consulting Group, BCG perspectives*

Bergstrom John C et Ty Dyna, 2016, **Economics of Carbon Capture and Storage**. (*Recent Advances in Carbon Capture and Storage*, DOI: 10.5772/67000, 2016)

Biberacher Markus (Dr.) et Gadocha Sabine **FINAL REPORT – GLOBAL ENERGY SCENARIOS Analysis of thematic emphasis, main drivers and communication strategies**. (*European Fusion Development Agreement, WP12-SER-ETM*)

BP (BP, 2018) **Natural gas - BP Statistical Review of World Energy 2018**.

Bradbury Judith, Ray Isha, Peterson Tarla, Wade Sarah, Wong-Parodi Gabrielle, Feldpausch Andrea, 2014, **The Role of Social Factors in Shaping Public Perceptions of CCS: Results of Multi-State Focus Group Interviews in the U.S.** (*Energy Procedia*, Février 2014, Vol. 1, p4665-4672)

Briest-Breda Cathy N., 2014, **Apprendre avec son marché : une application au travers d'une co-conception orientée usage en milieu industriel**. (*Humanisme et Entreprise*, Février 2014, Vol. 317, p83-102. DOI 10.3917/hume.317.0083)

Callon Michel, 1979, **L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique**, *Revue française de science politique*, 29<sup>e</sup> année, n°3, 1979. pp. 426-447; doi : 10.3406/rfsp.1979.418601

Callon Michel, 1986 **Some elements of a sociology of translation: domestication of the scallops and the fishermen of St Brieuc Bay**, *J. Law, Power, action and belief: a new sociology of knowledge?* London, Routledge, 1986, pp.196-223.

CALLON, Michel. **Sociologie de l'acteur réseau** In : *Sociologie de la traduction : Textes fondateurs* Paris : Presses des Mines, 2006. DOI : 10.4000/books.pressesmines.1201.

Carbon Capture & Storage Association (CCSA 2011-2018 site web) url : <http://www.ccsassociation.org> (consultations multiples tout au long de l'année)

Carbon Clean Solution, url : <http://www.carboncleansolutions.com/home> (Consulté en avril 2018)

Carbon Engineering Company url: <http://carbonengineering.com> (Consulté en juillet 2018)

Carbon Sequestration Leadership Forum, Mai 2005, **CSLF Fact Sheet**.

Captage, Stockages et Valorisation du CO<sub>2</sub> (*Club CO<sub>2</sub>*) Ressources et publications.  
url : [http://www.captage-stockage-valorisation-CO<sub>2</sub>.fr/](http://www.captage-stockage-valorisation-CO2.fr/) (Consulté en mars 2018)

Connaissance des Énergies, 2018, **Capture et stockage du CO<sub>2</sub> (CSC)** (*CDE, Fiches pédagogiques*)  
url : [https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/capture-et-stockage-du-CO<sub>2</sub>-csc](https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/capture-et-stockage-du-CO2-csc)  
(Consulté en octobre 2018)

Cheikho, Avin, 2015, **L'adoption des innovations technologiques par les clients et son impact sur la relation client - Cas de la banque mobile** – These. (*Universite Nice-Sophia Antipolis U. F. R. Institut D'administration Des Entreprises Ecole Doctorale : Despeg*, Novembre 2015)

Collet Philippe, 2014, **Captage et stockage du carbone : l'Union européenne avance lentement et en ordre dispersé**, *Environnement & Technique n°335*  
url : [https://www.actu-environnement.com/ae/news/application-directive-europeene-csc-stockage-geologique-CO<sub>2</sub>-21004.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/news/application-directive-europeene-csc-stockage-geologique-CO2-21004.php4) (Consulté en juillet 2018)

Conseil Mondial de l'Énergie, **Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050, Mise en musique des futurs de l'énergie**. Partenaire du projet Paul Scherrer Institute (PSI) (*World Energy Council*, 2013)

Corstena Mariëlle, Ramírez Andrea, Shen Li, Koornneef Joris, Faaija André, 2013, **Environmental impact assessment of CCS chains – Lessons learned and limitations from LCA literature**. (*International Journal of Greenhouse Gas Control*, Mars 2013, Vol. 13, p59-71)

De Figueiredo Mark Anthony, Reiner David, Herzog Howard, Oye Kenneth, 2007, **The Liability of Carbon Dioxide Storage**. (*Laboratory for Energy and the Environment, M.I.T., Cambridge*, Janvier 2007)

Dubin Kenneth, 2017, **Petra Nova is one of two carbon capture and sequestration power plants in the world**, *US Energy Information administration* October 31, 2017,  
url : <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33552> (Consulté en novembre 2017)

Deblock Christian, Fontan Jean-Marc, **Innovation et développement chez Schumpeter**, *Revue Interventions économiques* novembre 2012.  
url : <http://interventionseconomiques.revues.org/1463> (Consulté en novembre 2017)

Ekins Paul (Professor), Dr. Hughes Nick, UCL Energy Institute Mr. Pye Steve Dr. Winning Matthew, UCL Faculty of Laws Professor Macrory Richard Dr. Milligan Ben, University of Edinburgh Professor Haszeldine Stuart, UK Energy Research Centre Professor Watson Jim, 2017, **The role of CCS in meeting climate policy targets Understanding the potential contribution of CCS to a low carbon world, and the policies that may support that contribution**. (*Global CCS Institute*, Octobre 2017) A report commissioned by the Global CCS Institute Produced by: UCL Institute for Sustainable Resources

ENGO Network on CCS, 2017, **Moving CCS forward in Europe**. (*Global CCS Institute, Bellona Foundation, E3G, Zero Emission Resource Organisation*, Mai 2013)

European Commission, 2018, **A legal framework for the safe geological storage of carbon dioxide**. (Policies, information and services)  
url: [https://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs/directive\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/lowcarbon/ccs/directive_en) (Consulté en avril et en août 18)

Feenstra C.F.J, Mikunda T, Brunsting S, 2010, **What happened in Barendrecht? Case study on the planned onshore carbon dioxide storage in Barendrecht, the Netherlands.** (*Global CCS Institute*, Juin 2010)

Finon Dominique, 2017, **The carbon prices making low carbon plants competitive**, *CIREN*, 8<sup>th</sup> March 2017

Freeman, Chris & Soete, Luc, 1997, **The Economics of Industrial Innovation.**

Global CCS institute, 2011, **Economic Assessment of Carbon Capture and Storage Technologies**

Global CCS institute, 2012, **Potential cost reductions in CCS in the power sector: discussion paper**, May 2012

Global CCS institute, 2012, **Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>) Distribution Infrastructure, The opportunities and challenges confronting CO<sub>2</sub> transport for the purposes of carbon capture and storage (CCS), An observation paper**, AUGUST 2012.

Global CCS Institute, 2017, **The Global Status of CCS: 2017.** (Octobre 2017)

Global CCS Institute, 2017, **The Global Status of CCS: 2012.** (Octobre 2012)

Grand View Research, 2016, **Carbon Capture And Storage (CCS) Market Analysis By Application (EOR, Industrial & Agriculture), By Capture Technology (Pre-Combustion, Industrial, Oxy-Firing & Post-Combustion), Competitive Strategies, And Segment Forecasts, 2018 – 2025**, Free Sample Nov 2016.

url : <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/carbon-capture-storage-ccs-market>

Grimand Amaury, Alcouffe Simon, Buisson Marie-Laure, Brunel Olivier, 2006, **L'appropriation des outils de gestion: vers de nouvelles perspectives théoriques ?** (*PU Saint-Etienne, Collection Gestion*, Novembre 2006)

Ha-Duong Minh, Nadaï Alain, Campos Ana-Sofia, 2009, **A survey on the public perception of CCS in France.** (*Energy Procedia*, Février 2009, Vol. 1, p4757–4764)

Hone David, 2018, **Decarbonising heavy industry can't be done without large-scale CCS effort.** (*Energy Post*, 12 Juin 2018)

url: <http://energypost.eu/how-ccs-can-help-decarbonize-heavy-industry/> (consulté en août 18)

Hughes Gordon, 2017, **The Bottomless Pit - The Economics of Carbon Capture and Storage.** (*The Global Warming Policy Foundation, GWPF report 25*, ISBN 978-0-9931189-6-8)

International Energy Agency, 2011, **Carbon Capture and Storage and the London Protocol - Options for Enabling Transboundary CO<sub>2</sub> Transfer.** *OECD/IEA*

International Energy Agency, 2012, **World Energy Outlook 2012**

International Energy Agency, 2013, **Technology Roadmap Carbon capture and storage**, *Energy Technology Perspectives*

International Energy Agency, 2016, **20 Years of Carbon Capture and Storage – Accelerating Future Deployment.**

International Energy Agency, 2016, **Ready for CCS retrofit : The potential for equipping China's existing coal fleet with carbon capture and storage**, IEA 2016

International Energy Agency, 2017, **CO<sub>2</sub> Emissions from Fuel Combustion Highlights 2017**. OECD/IEA

International Energy Agency, 2017, **Energy Technology Perspectives 2017**. (IEA, Juin 2017)

International Energy Agency, 2017, **World Energy Outlook 2017**

International Energy Agency, 2017-2018, **Five keys to unlock CCS investments**.

International Organization for Standardization, **Carbon dioxide capture, transportation, and geological storage**. (website, ISO/TC 265)

url: <https://www.iso.org/committee/648607.html> (consulté en mars 2018)

IPCC, 2014, **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. (Cambridge University Press, *Summary for Policymakers*, 2014)

Islegen Özgen, Reichelstein Stefan, 2009, **The Economics of Carbon Capture and CO<sub>2</sub> Emission Charges**, (*Stanford University Graduate School of Business*, October 2009)

Jadot Yannick, 2011, **Feuille de route énergétique de l'UE 2050 La Commission européenne entravée par son conservatisme énergétique et industriel**, *Communiqué de presse 15.12.2011*

Jospe Christophe, 2016, **We can't rely on carbon capture and storage to make a dent in solving climate change without a carbon removal hook**. (*Medium*, 8 Juillet 2016)

url: <https://medium.com/@cjospe/we-cant-rely-on-carbon-capture-and-storage-to-make-a-dent-in-solving-climate-change-without-a-2f926f50e6bb> (consulté en août 2018)

JWN Trusted ennergy intelligence, **8 future technologies for carbon capture** March 8, 2017,  
url : <http://www.jwnenergy.com/article/2017/3/8-future-technologies-carbon-capture/> (consulté en

Karimia Farid & Toikkac Arho, 2018, **General public reactions to carbon capture and storage: Does culture matter?** (*International Journal of Greenhouse Gas Control*, Vol. 70, 2018, p193-201)

Kidder Tracy, 1981, **The Soul of a New Machine**. p. 119. ISBN 0-316-49197-7

Kilisek Roman (*Breaking Energy*, 3 Juin 2015) **Why We Need to Get from Carbon Capture & Storage (CCS) to Carbon Capture & Utilization (CCU)**.

url: <https://breakingenergy.com/2015/06/03/why-we-need-to-get-from-carbon-capture-storage-ccs-to-carbon-capture-utilization-ccu/> (consulté en juillet 2018)

Kirkendall Eric, **The shipping industry may soon be forced to cut its air pollution emissions**. *Moving Forward Network*, 2016)

url: <http://www.movingforwardnetwork.com/tag/global-warming/> (consulté en mai 2018)

Litynski, John & Plasynski, S.I & Spangler, Lee & Finley, Robert & Steadman, Edward & Ball, David & J. Nemeth, Kenneth & Mcpherson, Brian & Myer, Larry. (2009). **U.S. Department of Energy's Regional Carbon Sequestration Partnership Program: Overview**. Energy Procedia. 1. 3959-3967. 10.1016/j.egypro.2009.02.200.

Markusson Nils, Shakeley Simon et Evar Benjamin (Mai 2012) **The Social Dynamics of Carbon Capture and Storage: Understanding CCS representation governance and innovation.**

Mahil Aziza et Tremblay Diane-Gabrielle, **Théorie de l'acteur-réseau.** *Sciences, technologies et sociétés de A à Z.* Montréal : Presses de l'Université de Montréal, ISBN : 9782821895621, 2015)  
url : <http://books.openedition.org/pum/4363>.

Market Insider, Commodities, <https://markets.businessinsider.com/commodities/co2-emissionsrechte>

Martin-Amouroux Jean-Marie, 2015, **Consommation mondiale d'énergie 1800-2000** – les résultats. (*Encyclopédie de l'énergie*, Octobre 2015, Article: 061)

Mayer Nathalie (*Futura-Sciences.com*, Juillet 2017) **Séquestration du CO2 : une découverte capitale.**  
url : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/rechauffement-sequestration-co2-decouverte-capitale-56664/> (consulté en mai 2018)

Mcbride, Neil, 2003, **Actor-network theory and the adoption of mobile communications.** (*Geography*, October 2003, Vol. 88, No. 4, p266-276)

McKinsey&Company, 2010, **Impact of the financial crisis on carbon economics, v2.1 of the Global greenhouse gas Abatement cost curve**

Michel Dubois, 2017, «**Cela nous a échappé...**»: **théorie de l'acteur-réseau et le problème des générations scientifiques.** (*Social Science Information, CNRS-UCLA, USA, 2017, Vol. 56, p107-141*)

MIT Carbon Capture and Sequestration Technologies Program (*MIT*).  
url: <http://sequestration.mit.edu/index.html> (consulté à plusieurs reprises tout au long de l'année)

MIT Carbon Capture and Sequestration Technologies Program (*MIT*, Octobre 2014) **FutureGen Fact Sheet: Carbon Dioxide Capture and Storage Project.**  
url: <https://sequestration.mit.edu/tools/projects/futuregen.html> (consulté en mai 2018)

Mohr, L. B. 1969, **Determinants of Innovation in Organizations**, *The American Political Science Review*, 63 (1), 111-126.

Mokaddem Sarra **Analyse de l'échec des innovations dans un marché en émergence : approche intégratrice aux niveaux individuel et collectif. Gestion et management.** (*IRG - Université Paris-Est*, 2016, HAL Id: tel-01535624)

Noé Lecocq et Christophe Schoune (éditeur), 2013, **Captage & stockage du carbone, solution ou mirage ?** (*Fédération Inter-Environnement Wallonie*, Novembre 2013)

OCDE/ Office Statistique des Communautés Européennes, 2005, **Manuel d'Oslo, Principes directeurs pour le recueil et l'interprétation des données sur l'innovation, 3e édition.** (ISBN 92-64-01311-3 – © OCDE/COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES 2005)

Our World in Data, **Fossil Fuels**, by *Hannah Ritchie and Max Roser*  
url : <https://ourworldindata.org/fossil-fuels> (Consulté en avril 2018)

Oxburgh Ronald, Aldous Peter, Boswell Philip, Davies Chris, Hare Phil, Haszeldine Stuart, Smith James, Temperton Ian, White Anthony, Worthington Bryony, 2016, **Lowest cost decarbonisation for the UK:**

**the critical role of ccs.** (*Report to the Secretary of State for Business, Energy and Industrial Strategy from the Parliamentary Advisory Group on Carbon Capture and Storage (CCS)*, September 2016)

Pel Bonno, 2012, **Trojan horses in System Innovation; A dialectical perspective on the paradox of acceptable novelty** (*7th International Conference in Interpretive Policy Analysis "Understanding the Drama of Democracy. Policy Work, Power and Transformation" July 5th–July 7th, 2012, Tilburg, the Netherlands*)

Pietzner, Katja & Schumann, Diana & Tvedt, Sturle & Torvatn, Hans & Næss, Robert & Reiner, David & Anghel, Sorin & Cismaru, Diana & Constantin, Carmencita & D.L. Daamen, Dancker & Dudu, Alexandra & Esken, Andrea & Gemeni, V & Ivan, Loredana & Koukouzas, Nikolaos & Kristiansen, Glenn & Markos, Angelos & Mors, Emma & C. Nihfidov, Oana & Ziogou, Fotini, 2011, **Public Awareness and Perceptions of Carbon Dioxide Capture and Storage (CCS): Insights from Surveys Administered to Representative Samples in Six European Countries** (*Energy Procedia*, 2011, Vol. 4, p6300-6306).

Renner Marie, 2014, **Carbon Prices And Ccs Investment : Comparative Study Between The European Union And China**, *EconomiX, Université Paris Ouest France, Climate Economic Chair, France*

Rogers Everett M., 1995, *Diffusion of Innovations*, Free Press

SaskPower website, 2018, **'SaskPower CCS —Boundary Dam CCS Project'**, *SaskWind calculations*, url: <https://www.saskwind.ca/coal-wind-ccs/> (Consulté en juillet 2018)

Severinsen Greg, 2014, **Constructing a Legal Framework for Carbon Capture and Storage in New Zealand: Approaches to Legislative Design.** (*Energy Procedia*, 2014, Vol. 63, p6629-6661)

Sharp Jacqueline **Carbon Capture and Storage: The Views of the Canadian Public.** (*Carbon Capture and Storage, The Pembina Institute / ISEEE*, Octobre 2008)

Stuart Ben, 2011, **Addressing the Grand Challenge of atmospheric carbon dioxide: Geologic sequestration vs. biological recycling**, *Journal of Biological Engineering · November 2011 DOI: 10.1186/1754-1611-5-14 Old Dominion University*

Teffer Peter, 2018, **EU to have third attempt at financing CO2 storage**, *EU Observer, Brussels, 6 Feb, 2018*  
url : <https://euobserver.com/environment/140859> (Consulté en août 2018)

The Economist, 2009, **Carbon capture and storage Trouble in store**, Illustration by Belle Mellor  
url: <https://www.economist.com/briefing/2009/03/05/trouble-in-store> (consulté en août 2018)

Thierry Gauthier, Florent Guillou, Stéphane Bourgeon et Hélène Stainton, 2013, **La combustion en boucle chimique Un procédé en rupture pour le captage du CO<sub>2</sub>.** (*l'actualité chimique*, Février-Mars 2013, n° 371-372)

TransAlta, 2011, **Project pioneer: Canadian and Albertan perceptions of carbon capture and storage ( ccs ) – establishing baselines.** (*Produced for: Global CCS Institute, Septembre 2011*)

UK CCS Research Center <https://ukccsrc.ac.uk/> (consulté en juillet 2018)

Ulrike Felt, Rayvon Fouché, Clark A. Miller, Laurel Smith- **"A Critical Theory of Technology,"**. Doerr (*Handbook of Science and Technology Studies, MIT Press, 2017, pp. 635-663*)

Walsh Isabelle et Renaud Alexandre, 2010, **La théorie de la traduction revisitée ou la conduite du changement traduit. Application à un cas de fusion-acquisition nécessitant un changement de Système d'Information.** (*Management & Avenir*, Septembre 2010, Vol. 39, p. 283-302. DOI 10.3917/mav.039.0283)

Watts Jonathan, 2011, **Carbon capture progress has lost momentum, says energy agency**, *The Guardian*, Thu 22 Sep 2011 20.21 BST  
url : <https://www.theguardian.com/environment/2011/sep/22/carbon-capture-and-storage-energy>  
(Consulté en Juillet 2018)

Wilaiwan Chanmanee, Mohammad Fakrul Islam, Brian H. Dennis, and Frederick M. MacDonnell, 2016, **Solar photothermochemical alkane reverse combustion** *Department of Chemistry and Biochemistry, University of Texas at Arlington, Arlington, Department of Mechanical and Aerospace, Engineering, University of Texas at Arlington, Arlington TX 76019* Edited by Alexis T. Bell, University of California, Berkeley, CA, and approved January 21, 2016 (received for review August 25, 2015)

Wood Daniel, 2016, **6 Charts that Will Make You Optimistic About America's Clean Energy Future**, *US Government Department of Energy*, SEPTEMBER 28, 2016  
url: <https://www.energy.gov/articles/6-charts-will-make-you-optimistic-about-america-s-clean-energy-future> (Consulté en août 2018)

World Economic Forum, 2015 **Is carbon capture technology economically viable?** 07 Dec 2015  
url: <https://www.weforum.org/agenda/2015/12/is-carbon-capture-technology-economically-viable/>  
(Consulté en août 2018)

## 9. Annexes

### Annexe 1 : Liste des projets en opération

Operating						
Name	Location	Operation date	Industry	Capture type	Capture capacity (Mtpa)	Primary storage type
Terrell Natural Gas Processing Plant (formerly Val Verde Natural Gas Plants)	United States	1972	Natural Gas Processing	Industrial Separation	0.4 - 0.5	Enhanced oil recovery
Enid Fertilizer	United States	1982	Fertiliser Production	Industrial Separation	0.7	Enhanced oil recovery
Shute Creek Gas Processing Plant	United States	1986	Natural Gas Processing	Industrial Separation	7.0	Enhanced oil recovery
Sleipner CO2 Storage	Norway	1996	Natural Gas Processing	Industrial Separation	1.0	Dedicated Geological Storage
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	Canada	2000	Synthetic Natural Gas	Industrial Separation	3.0	Enhanced oil recovery
Snohvit CO2 Storage	Norway	2008	Natural Gas Processing	Industrial Separation	0.7	Dedicated Geological Storage
Century Plant	United States	2010	Natural Gas Processing	Industrial Separation	8.4	Enhanced oil recovery
Air Products Steam Methane Reformer	United States	2013	Hydrogen Production	Industrial Separation	1.0	Enhanced oil recovery
Coffeyville Gasification Plant	United States	2013	Fertiliser Production	Industrial Separation	1.0	Enhanced oil recovery
Lost Cabin Gas Plant	United States	2013	Natural Gas Processing	Industrial Separation	0.9	Enhanced oil recovery
Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	Brazil	2013	Natural Gas Processing	Industrial Separation	1.0	Enhanced oil recovery
Boundary Dam Carbon Capture and Storage	Canada	2014	Power Generation	Post-combustion capture	1.0	Enhanced oil recovery
Quest	Canada	2015	Hydrogen Production	Industrial Separation	1.0	Dedicated Geological Storage
Uthmaniyah CO2-EOR Demonstration	Saudi Arabia	2015	Natural Gas Processing	Industrial Separation	0.8	Enhanced oil recovery
Abu Dhabi CCS (Phase 1 being Emirates Steel Industries)	United Arab Emirates	2016	Iron and Steel Production	Industrial Separation	0.8	Enhanced oil recovery
Illinois Industrial Carbon Capture and Storage	United States	2017	Ethanol Production	Industrial Separation	1.0	Dedicated Geological Storage
Petra Nova Carbon Capture	United States	2017	Power Generation	Post-combustion capture	1.4	Enhanced oil recovery

Source : <https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>

## Annexe 2 : Liste des projets en construction

In Construction						
Name	Location	Operation date	Industry	Capture type	Capture capacity (Mtpa)	Primary storage type
Gorgon Carbon Dioxide Injection	Australia	2018	Natural Gas Processing	Industrial Separation	3.4 - 4.0	Dedicated Geological Storage
Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with Agrium CO2 Stream	Canada	2019	Fertiliser Production	Industrial Separation	0.3 - 0.6	Enhanced oil recovery
Alberta Carbon Trunk Line ("ACTL") with North West Redwater Partnership's Sturgeon Refinery CO2 Stream	Canada	2019	Oil Refining	Industrial Separation	1.2 - 1.4	Enhanced oil recovery
Sinopec Qilu Petrochemical CCS	China	2019	Chemical Production	Industrial Separation	0.4	Enhanced oil recovery
Yanchang Integrated Carbon Capture and Storage Demonstration	China	2020	Chemical Production	Industrial Separation	0.4	Enhanced oil recovery

Source : <https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>

## Annexe 3 : Liste des projets en développement

Advanced Development						
Name	Location	Operation date	Industry	Capture type	Capture capacity (Mtpa)	Primary storage type
CarbonNet	Australia	2020s	Under evaluation	Under evaluation	1.0 - 5.0	Dedicated Geological Storage
Lake Charles Methanol	United States	2022 (Institute estimate)	Chemical Production	Industrial Separation	4.2	Enhanced oil recovery
Texas Clean Energy Project	United States	2022 (Institute estimate)	Chemical Production	Industrial Separation	1.5 - 2.0	Enhanced oil recovery
Norway Full Chain CCS	Norway	2023 - 2024	Cement Production and Waste-to-Energy	Various	0.8	Dedicated Geological Storage

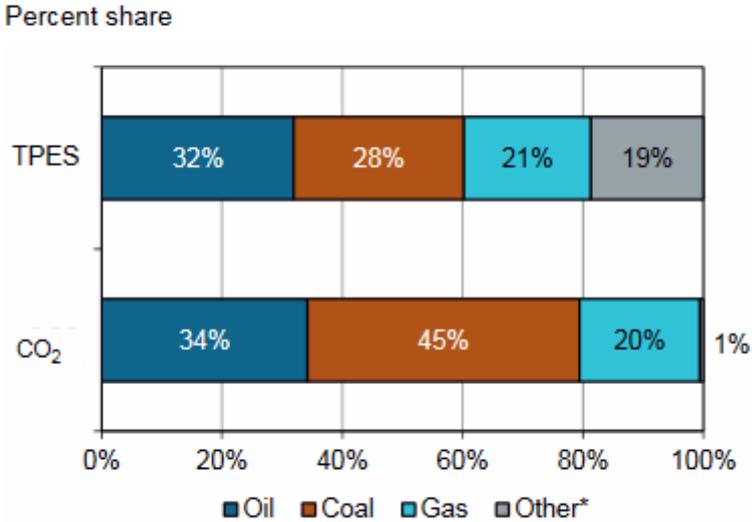
## Early Development

Name	Location	Operation date	Industry	Capture type	Capture capacity (Mtpa)	Primary storage type
China Resources Power (Haifeng) Integrated Carbon Capture and Sequestration Demonstration	China	2020's	Power Generation	Post-combustion capture	1.0	Dedicated Geological Storage
Huaneng GreenGen IGCC Large-scale System (Phase 3)	China	2020's	Power Generation	Pre-combustion capture (gasification)	2.0	Enhanced oil recovery
Korea-CCS 1	South Korea	2020's	Power Generation	Post-combustion capture	1.0	Dedicated Geological Storage
Korea-CCS 2	South Korea	2020's	Power Generation	Under evaluation	1.0	Dedicated Geological Storage
Shanxi International Energy Group CCUS	China	2020's	Power Generation	Oxy-fuel combustion capture	2.0	Not specified
Shenhua Ningxia CTL	China	2020's	Coal-to-liquids (CTL)	Industrial Separation	2.0	Not specified
Sinopec Shengli Power Plant CCS	China	2020's	Power Generation	Post-combustion capture	1.0	Enhanced oil recovery
Teesside Collective	United Kingdom	2020's	Various	Various	0.8	Dedicated Geological Storage
Sinopec Eastern China CCS	China	2020-2021	Fertiliser Production	Industrial Separation	0.5	Enhanced oil recovery
Caledonia Clean Energy	United Kingdom	2024	Power Generation	Post-combustion capture	3.0	Dedicated Geological Storage
South West Hub	Australia	2025	Fertiliser Production and Power Generation	Industrial Separation	2.5	Dedicated Geological Storage

Source : <https://www.globalccsinstitute.com/projects/large-scale-ccs-projects>

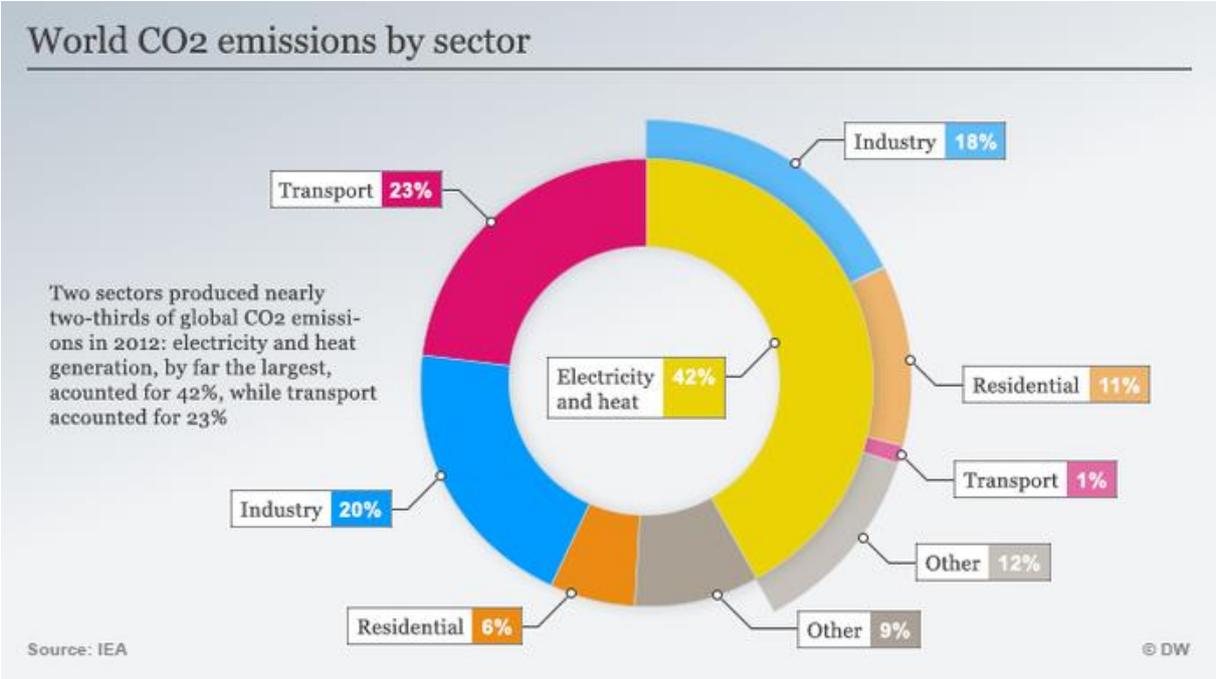
Annexe 4 : Statistiques sur les émissions de CO<sub>2</sub> par source et par secteur

**Figure 6. World primary energy supply and CO<sub>2</sub> emissions: shares by fuel in 2015**



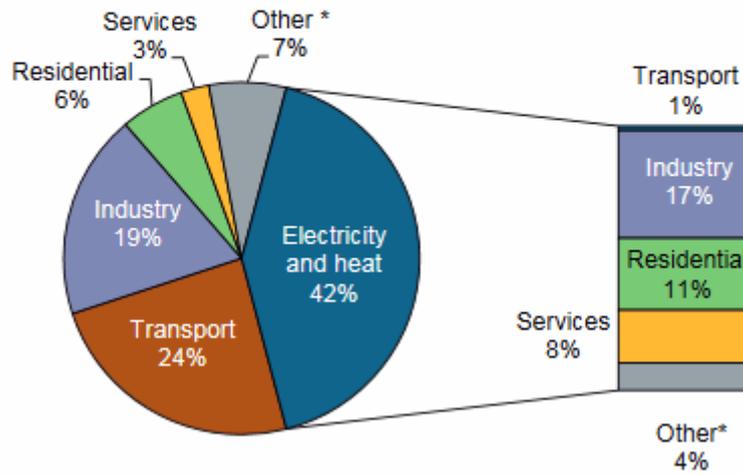
\* Other includes nuclear, hydro, geothermal, solar, tide, wind, biofuels and waste.

Source : CO2 emissions from fuel combustion 2017 HIGHLIGHTS, IEA



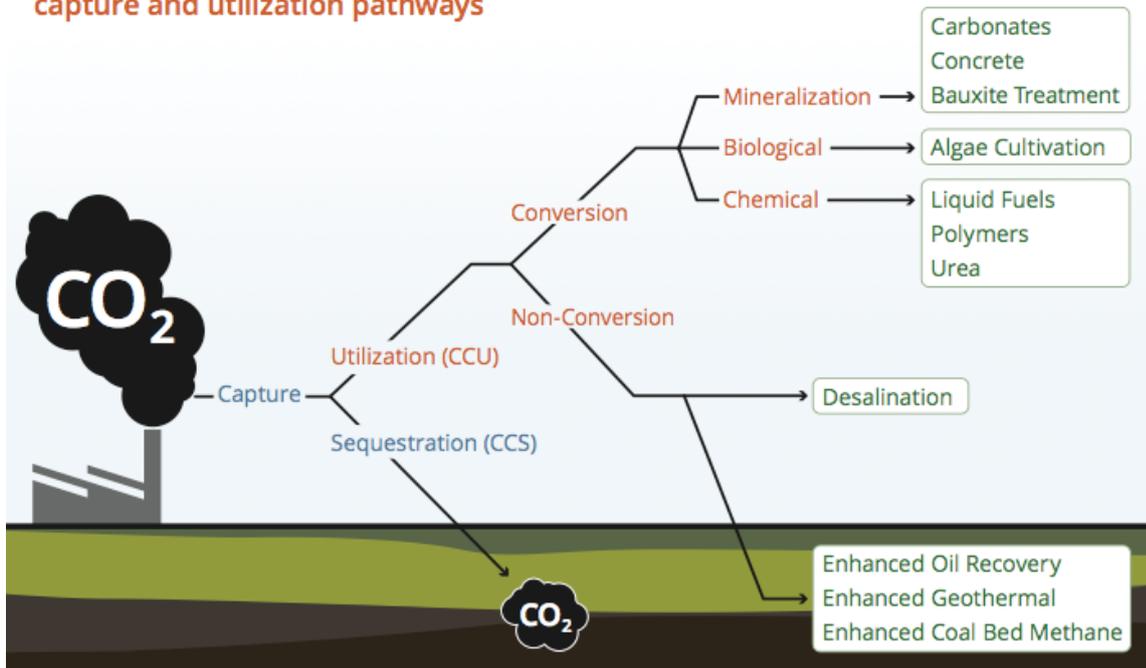
Source : <http://www.movingforwardnetwork.com/tag/global-warming/>

**Figure 10. World CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion by sector, 2015**



Annexe 5 : Utilisations du CO<sub>2</sub> capturé

**Figure 1. Paving the way — A selection of today's carbon capture and utilization pathways**



Source : <https://breakingenergy.com/2015/06/03/why-we-need-to-get-from-carbon-capture-storage-ccs-to-carbon-capture-utilization-ccu/>

## Annexe 6 : Scénarios de l'IEA

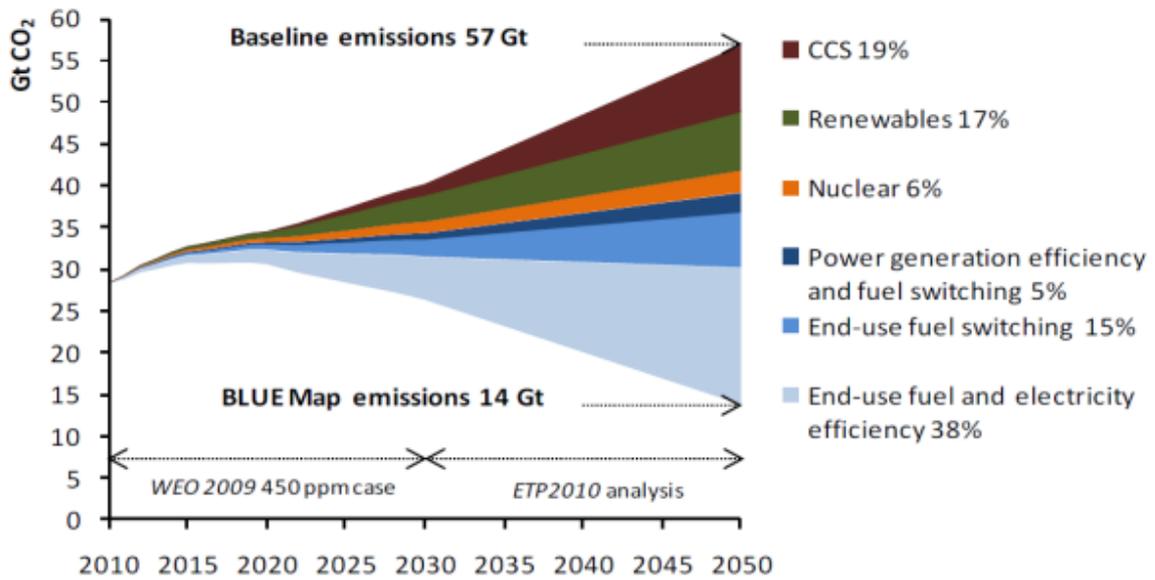
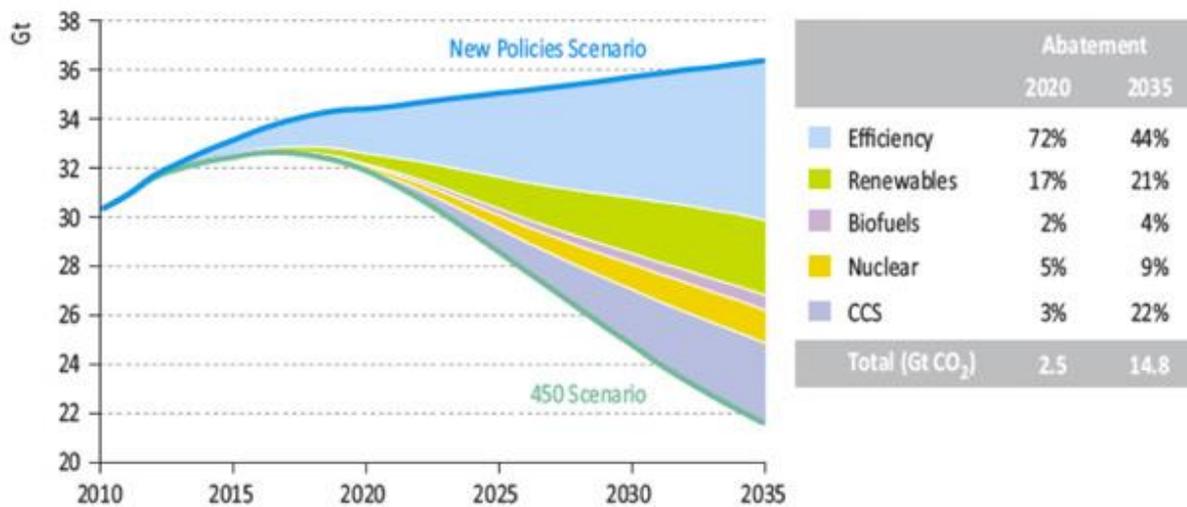


Figure 3.2 Key technologies for achieving CO<sub>2</sub> emission reductions in the blue map scenario

Dans les versions des années précédentes, les scénarios de base était le *Baseline scenario* qui considérait que rien ne change, *business-as-usual* (BAU). Aucune nouvelle mesure climatique ou énergétique n'y était prise en compte. Il s'agit de la borne du haut. La borne du bas était le scénario *BLUE map*, celui-ci considère une réduction de 50 % des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'énergie d'ici à 2050. Ce scénario se base sur une approche à moindre coût du développement technologique et envisage une augmentation des températures entre 2 et 3°C.



## Annexe 7 : 29 aspects relatifs aux CCS devant être organisés par les gouvernements locaux

**Table ES.1:** Key issues relating to CCS regulatory frameworks

1. Classifying CO <sub>2</sub>	11. Engaging the public in decision making	21. Corrective measures and remediation measures
2. Property rights	12. CO <sub>2</sub> capture	22. Liability during the project period
3. Competition with other users and preferential rights issue	13. CO <sub>2</sub> transportation	23. Authorisation for storage site closure
4. Transboundary movement of CO <sub>2</sub>	14. Scope of framework and prohibitions	24. Liability during the post-closure period
5. International laws for the protection of the marine environment	15. Definitions and terminology applicable to CO <sub>2</sub> storage regulations	25. Financial contributions to post-closure stewardship
6. Providing incentives for CCS as part of climate change mitigation strategies	16. Authorisation of storage site exploration activities	26. Sharing knowledge and experience through the demonstration phase
7. Protecting human health	17. Regulating site selection and characterisation activities	27. CCS ready
8. Composition of the CO <sub>2</sub> stream	18. Authorisation of storage activities	28. Using CCS for biomass-based sources
9. The role of environmental impact assessment	19. Project inspections	29. Understanding enhanced hydrocarbon recovery with CCS
10. Third-party access to storage site and transportation infrastructure	20. Monitoring, reporting and verification requirements	

Carbon Capture And Storage, Model Regulatory Framework, November 2010 INFORMATION PAPER

## Annexe 8 : Clefs pour débloquer des financements

# Five keys to unlock CCS investment

International Energy Agency analysis has consistently highlighted the critical role of carbon capture and storage (CCS) technologies in meeting global climate objectives. Yet investment in CCS will need an urgent boost if it is to deliver the deep emissions reductions needed in the power sector and in many industrial processes. In this report, the IEA outlines the "Five Keys to Unlock CCS Investment":

- ▶ Harvest "low-hanging fruit" to build CCS deployment and experience from the ground up.
- ▶ Tailor policies to shepherd CCS through the early deployment phase and to address the unique integration challenges for these facilities.
- ▶ Target multiple pathways to reduce costs from technological innovation in carbon capture and CO<sub>2</sub> utilisation to progressive financing arrangements.
- ▶ Build CO<sub>2</sub> networks and accelerate CO<sub>2</sub> storage assessments in key regions.
- ▶ Strengthen partnerships and co operation between industry and governments.

Source IEA 2017-2018

## Annexe 9 : Projets arrêtés ou inactifs provenant du site du MIT

Cancelled and Inactive Projects							
<a href="#">USA</a>							
Project Name	Leader	Location	Feedstock	Size	Capture Process	CO <sub>2</sub> Fate	Status
<a href="#">FutureGen</a>	FutureGen Alliance	Illinois	Coal	200 MW	Oxy	Saline	Cancelled
<a href="#">HECA</a>	SCS	California	Petcoke	400	Pre	EOR/ Saline	Cancelled
<a href="#">Lake Charles</a>	Leucadia Energy	Louisiana	Methanol Production	4.5 MW	EOR	Planning	Cancelled
<a href="#">Kimberlina</a>	Clean Energy Systems	California	Coal	50 MW	Oxy	Saline	Cancelled
<a href="#">Carson</a>	BP	California	Coal	500 MW	Post	Saline	<a href="#">Replaced with HECA</a>
<a href="#">Taylorville</a>	Tenaska	Illinois	Coal	602 MW	Pre	Saline	Cancelled

<a href="#">Indiana Gasification</a>	Leucadia	Indiana	Coal	5 Mt/yr	Pre	EOR	On Hold
<a href="#">Antelope Valley</a>	Basin Electric	North Dakota	Coal	120 MW	Post	EOR	Cancelled
<a href="#">Sweeny Gasification</a>	Conoco Phillips	Texas	Coal	680 MW	Pre	Saline/EOR	On Hold
<a href="#">Trailblazer</a>	Tenaska	Texas	Coal	765 MW	Post	EOR	Cancelled
<a href="#">ZENG Worsham-Steed</a>	Worsham-Steed	Texas	Coal	70 MW	Oxy	EOR	Cancelled
<a href="#">Wallula</a>	Wallula Resource	Washington	Coal	600 MW	Pre	Saline	Cancelled
AEP Mountaineer	AEP	West Virginia	Coal	235 MW	Post	Saline	Cancelled
<a href="#">Big Bend Station</a>	Siemens	FL, USA	Coal	1 MW	Post	Vented	Cancelled
<a href="#">Appalachian Power</a>	AEP	West Virginia	Coal	629 MW	Pre	Saline	Cancelled
<a href="#">Canada</a>							
Project Name	Leader	Location	Feedstock	Size	Capture Process	CO <sub>2</sub> Fate	Status
<a href="#">Swan Hills</a>	Swan Hills Synfuels	Alberta	In situ Coal Gasification	1.3 MT/Yr	Pre	EOR	Cancelled
Bow City	BCPL	Alberta	Coal	1000	Post	EOR	On Hold
Belle Plaine	TransCanada	Saskatchewan	Petcoke	500 MW	Pre	Undecided	Dormant
Project Pioneer	TransAlta	Alberta	Coal	450 MW	Post	Saline/EOR	Cancelled
<a href="#">European Union</a>							
Project Name	Leader	Location	Feedstock	Size	Capture Process	CO <sub>2</sub> Fate	Status
Porto Tolle	ENEL	Italy	Coal	250 MW	Post	Saline	On Hold
Getica	Turceni Energy	Romania	Coal	330 MW	Post	Saline	On Hold
<a href="#">Green Hydrogen</a>	Air Liquide	Netherlands	H <sub>2</sub> Production	0.55 Mt/yr	EOR	Planning	On Hold
<a href="#">Eemshaven</a>	Essent	Netherlands	Coal	1600 MW	Post	EOR	On Hold
<a href="#">Teesside Low Carbon</a>	Progressive	UK	Coal	400 MW	Pre	Depleted Oil	On Hold
<a href="#">ULCOS Florange</a>	ArcelorMittal	France	Steel Production	0.7 Mt/yr	Post	Saline	On Hold
ROAD	E.ON	Netherlands	Coal	250	Post	Depleted Oil or Gas	On Hold
Magnum	Nuon	Netherlands	Various	1200 MW	Pre	Depleted Oil or Gas	On Hold
<a href="#">Killingholme</a>	C.GEN	UK	Coal	470	Pre	Saline	Cancelled

Compostilla	ENDESA	Spain	Coal	30-320 MW	Oxy	Saline	Cancelled
Goldenbergwerk	RWE	Germany	Coal	450 MW	Pre	Saline	Cancelled
Janschwalde	Vattenfall	Germany	Coal	300 MW	Oxy	EGR	Cancelled
<a href="#">Barendrecht</a>	Shell	Netherlands	Oil Refinery	0.4 Mt/Yr	Post	Depleted Gas	Cancelled
Belchatow	PGE	Poland	Coal	250 MW	Post	Saline	Cancelled
Longannet	Scottish Power	UK	Coal	300 MW	Post	Saline	Cancelled
<a href="#">FINNCAP</a>	Fortum	Finland	Coal	565 MW	Post	Depleted Gas	Cancelled
<a href="#">Hunterston</a>	Ayrshire Power	UK	Coal	1,600 MW	Post	Depleted Gas	Cancelled
<b>Norway</b>							
<b>Project Name</b>	<b>Leader</b>	<b>Location</b>	<b>Feedstock</b>	<b>Size</b>	<b>Capture Process</b>	<b>CO<sub>2</sub> Fate</b>	<b>Status</b>
<a href="#">Kårstø</a>	Naturkraft	Norway	Gas	420 MW	Post	Saline	On Hold
<a href="#">Longyearbyen</a>	Unis CO <sub>2</sub>	Norway	Coal	N/A	Post	Saline	On Hold
<a href="#">Zeng Risavika</a>	CO <sub>2</sub> Norway	Norway	Gas	50 MW	Oxy	Saline	Cancelled
<a href="#">Halten</a>	Statoil	Norway	Gas	860 MW	Post	EOR	Cancelled
<b>Rest of the World</b>							
<b>Project Name</b>	<b>Leader</b>	<b>Location</b>	<b>Feedstock</b>	<b>Size</b>	<b>Capture Process</b>	<b>CO<sub>2</sub> Fate</b>	<b>Start-up</b>
<a href="#">HPAD</a>	Masdar	UAE	Gas	400	Pre	EOR	On Hold
<a href="#">ZeroGen</a>	ZeroGen	Australia	Gas	2 MT/Yr	Pre	Saline	Cancelled
<a href="#">Kwinana</a>	BP	Australia	Coal	500 MW	Pre	Saline	Cancelled

## Annexe 10 : Centrales CCS opérationnelles



Projet pilote de centrale sans émission de CO<sub>2</sub> à Brandenburg, Allemagne



The Sleipner A project injects carbon dioxide into saltwater aquifers deep beneath the sea floor off the Norwegian coast. (Credit: Statoil).