

Ministère de l'enseignement et de la recherche scientifique



Université de Sfax

École nationale d'ingénieurs de Sfax

Département de génie géologique

Projet de Fin d'année

La valorisation et la séquestration de CO₂ dans les
formations géologiques

Réalisé par : HAMDI Ahmed

2^{ème} année génie géoressources et
environnement

Option : géoressource

Encadrant: Mr KALLEL Monem

Examineur: Mr AHMADI Riadh

Année universitaire 2024/2025

Table des matières

<i>Chapitre 1 : Le dioxyde de carbone (CO₂), un gaz à effet de serre au cœur des enjeux climatiques.....</i>	5
I.Introduction :	5
II.Le CO ₂ : composition, propriétés et rôle dans les cycles naturels :	5
1.Définition et caractéristiques moléculaires :	5
2.Propriétés physico-chimiques fondamentales :	5
3.Rôle de CO ₂ dans le cycle de carbone :	6
4.Source anthropique d'émission de CO ₂ :	7
III.Impact du CO ₂ sur le changement climatique :	8
1.Mécanisme de l'effet de serre :	8
2.Contribution spécifique du CO ₂ dans le réchauffement global :	8
3.Conséquences environnementales :	9
IV.Conclusion :	10
<i>Chapitre 2 : Méthodes de valorisation de CO₂</i>	11
I.Introduction :	11
II.Valorisation du CO ₂ :	11
1.Valorisation physique :	12
2. Valorisation biologique :	14
3.Valorisation chimique :	14
III.Conclusion :	17
<i>Chapitre 3 : La Séquestration de CO₂ dans les formations géologiques</i>	18
I.Introduction :	18
II.Les formations géologiques adaptées à la séquestration de CO ₂ :	18

1.La séquestration de CO2 dans les Aquifères Salins Profonds :	18
2. La séquestration de CO2 dans les couches de sels :	20
III.Conclusion :	22

*Chapitre 4 : Etude de Cas : Projet de séquestration de CO₂ de Sleipner (Norvège) .***24**

I.Injection, stockage et surveillance à Sleipner (Norvège).....	24
1.Localisation de champ de Sleipner (Norvège) :.....	24
2.Histoire de projet :	25
3.Conception du projet :	25
4.Surveillance et modélisation du réservoir :	28
5.Aperçu sur la capacité et l'intégrité du stockage :	33
II.Conclusion :	34

Liste des figures

<u>Figure 1 le cycle de carbone</u>	8
<u>Figure 2 : l'effet de serre</u>	9
<u>Figure 3 les voies de Valorisation</u>	11
<u>Figure 4 Principe de la RAH</u>	13
<u>Figure 5 Figure : a. Stockage « ouvert » à gauche, b. Stockage « fermé » à droite (Bentham et Kirby, 2005)</u>	18
<u>Figure 6 : Localisation de Sleipner Vest, Sleipner Øst et des champs voisins, près de la frontière entre la Norvège et le Royaume Uni.</u>	22
<u>Figure 7 : Le site de stockage de Sleipner montrant la distribution approximative du panache de CO₂, en 2008, sur la base de données sismiques time-lapse3 (document Statoil).</u>	24
<u>Figure 8 : Schéma du processus de compression du CO₂ à Sleipner (document Statoil)</u>	25
<u>Figure 9 : Conception du puits d'injection de CO₂ à Sleipner</u>	26
<u>Figure 10 : Coupe sismique en ligne croisée passant par le point d'injection, issue de la campagne de surveillance sismique de 2020.</u>	27
<u>Figure 11 : Coupes sismiques arbitraires à travers la partie principale du panache de CO₂, du S-SO vers le N-NE (a) Sismique de référence (1994), (b) Différence sismique entre 1999 et 1994, (c) Différence sismique entre 2010 et 1994, (d) Différence sismique entre 2020 et 1994.</u>	29

Introduction générale :

Le changement climatique représente aujourd'hui l'un des défis les plus critiques de notre époque. Parmi les nombreux gaz à effet de serre responsables de ce phénomène, le dioxyde de carbone (CO₂) est le plus abondant et le plus durable dans l'atmosphère. Issu principalement de la combustion des énergies fossiles et des activités industrielles, le CO₂ est au cœur des préoccupations environnementales mondiales.

Face à l'urgence climatique et à l'augmentation continue des émissions de CO₂, la communauté scientifique et industrielle s'oriente vers des stratégies innovantes et durables pour limiter son accumulation. Parmi ces solutions, la **valorisation du CO₂** émerge comme une approche prometteuse. Elle consiste à capter le dioxyde de carbone, non pas pour le stocker, mais pour le **réutiliser comme matière première**, dans une logique d'économie circulaire du carbone.

Cette démarche s'inscrit dans une dynamique de transition énergétique et vise à transformer un résidu polluant en ressource utile pour produire des carburants synthétiques, des matériaux de construction, des produits chimiques ou encore des bioproduits. Elle ouvre ainsi la voie à une nouvelle industrie bas-carbone, plus respectueuse de l'environnement.

Problématique :

Comment transformer le CO₂ en une source utile ?

Chapitre 1 : Le dioxyde de carbone (CO₂), un gaz à effet de serre au cœur des enjeux climatiques

I. Introduction :

Le dioxyde de carbone (CO₂) est aujourd'hui au centre des préoccupations climatiques mondiales. Bien qu'il soit un composant naturel de l'atmosphère, son accumulation excessive, principalement due aux activités humaines, en fait le principal contributeur à l'effet de serre. Comprendre son origine, son comportement et son impact environnemental est essentiel pour évaluer les enjeux liés à sa gestion et envisager des solutions de valorisation durables.

II. Le CO₂ : composition, propriétés et rôle dans les cycles naturels :

1. Définition et caractéristiques moléculaires :

Le dioxyde de carbone (CO₂) est une molécule linéaire composée d'un atome de carbone central doublement lié à deux atomes d'oxygène. Ce gaz incolore et inodore, naturellement présent dans l'atmosphère à faible concentration (~0,04 %), joue un rôle crucial dans les équilibres climatiques et biologiques.

- ❖ Structure et polarité : Bien que la molécule soit symétrique et globalement apolaire, ses liaisons C=O sont polarisées, expliquant sa capacité à absorber le rayonnement infrarouge.
- ❖ État naturel : Sous conditions standards (25°C, 1 atm), le CO₂ est un gaz, mais il peut se liquéfier sous pression ou se solidifier en "glace sèche" à -78,5°C.

2. Propriétés physico-chimiques fondamentales :

Le CO₂ possède plusieurs propriétés physico-chimiques importantes qui influencent son comportement dans l'atmosphère et son impact sur le climat. Parmi celles-ci :

- ❖ Solubilité dans l'eau : Le CO₂ est soluble dans l'eau et forme de l'acide carbonique (H₂CO₃) lorsqu'il y est dissous, ce qui participe aux processus de régulation du pH des océans.

- ❖ Point de sublimation : Le CO₂ se sublime à -78,5 °C sous pression atmosphérique, passant directement de l'état solide (glace sèche) à l'état gazeux, sans passer par la phase liquide.
- ❖ Absorption infrarouge : Le CO₂ est un gaz à effet de serre majeur, absorbant et émettant des radiations infrarouges, ce qui contribue au réchauffement de la planète.
- ❖ Densité : Environ 1,98 kg/m³ à 0 °C et 1 atmosphère, soit plus dense que l'air.

3. Rôle de CO₂ dans le cycle de carbone :

Le dioxyde de carbone (CO₂) joue un rôle essentiel dans le cycle naturel du carbone, un processus fondamental qui régule la composition de l'atmosphère terrestre et soutient la vie sur Terre. Voici les principales étapes où le CO₂ intervient :

- ❖ Photosynthèse : Les plantes, les algues et certaines bactéries absorbent le CO₂ de l'atmosphère pour produire de l'oxygène et du glucose à travers la photosynthèse.
Équation simplifiée : $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Lumière}} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$
- ❖ Respiration : Les êtres vivants, y compris les plantes la nuit, utilisent l'oxygène pour transformer le glucose en énergie, libérant ainsi du CO₂ dans l'atmosphère
- ❖ Océans et absorption : Les océans absorbent une partie du CO₂ atmosphérique à leur surface. Une fois dissous, il participe à l'équilibre acido-basique de l'eau et peut être stocké sous forme de carbonates dans les sédiments marins.
- ❖ Décomposition et formation des roches : Lorsque les organismes meurent, le carbone de leurs tissus peut être stocké à long terme sous forme de matière organique fossile (charbon, pétrole), ou de roches carbonatées (comme le calcaire).

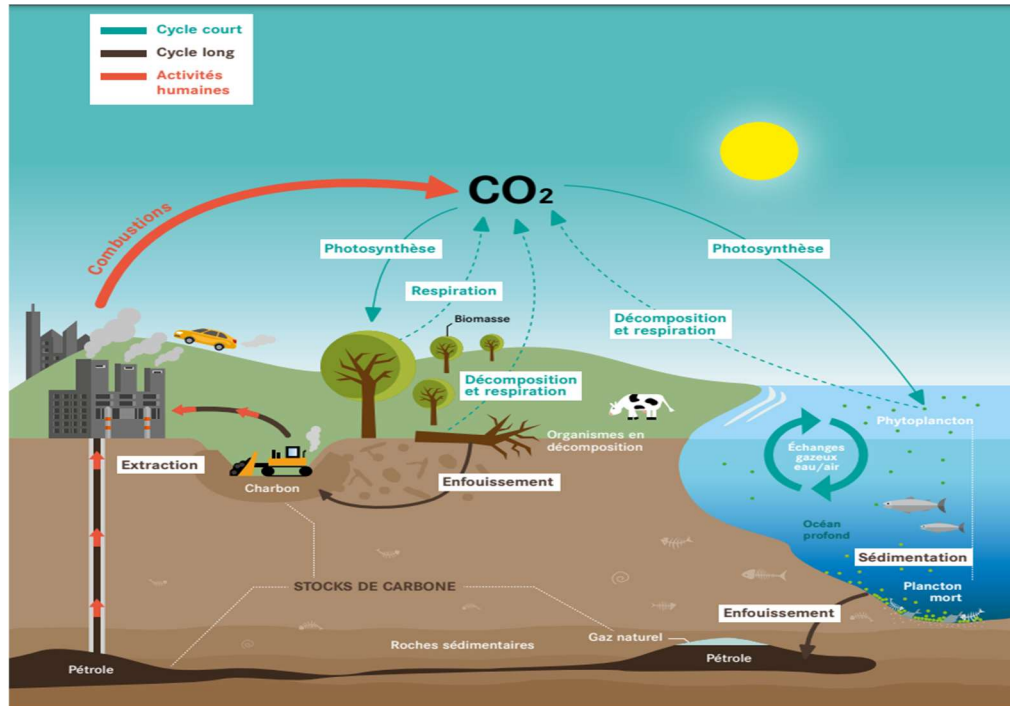


Figure 1 le cycle de carbone

4. Source anthropique d'émission de CO₂ :

Le dioxyde de carbone (CO₂) est le principal gaz à effet de serre émis par les activités humaines, notamment dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie, de l'agriculture et de l'aménagement du territoire.

4.1 Combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) :

La combustion des énergies fossiles constitue la source principale d'émission de CO₂ à l'échelle mondiale. Elle alimente les besoins en électricité, en chaleur, en transport et en industrie.

4.2 Processus industriels (Notamment la production de ciment) :

La Cimenterie : lors de la décarbonatation du calcaire ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), une grande quantité de CO₂ est relâchée. Ce secteur représente environ 7 % des émissions mondiales.

III. Impact du CO₂ sur le changement climatique :

1. Mécanisme de l'effet de serre :

L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet à la Terre de maintenir une température compatible avec la vie. Il fonctionne grâce à certains gaz présents dans

l'atmosphère appelés gaz à effet de serre (GES) qui captent une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et le réémettent vers le sol

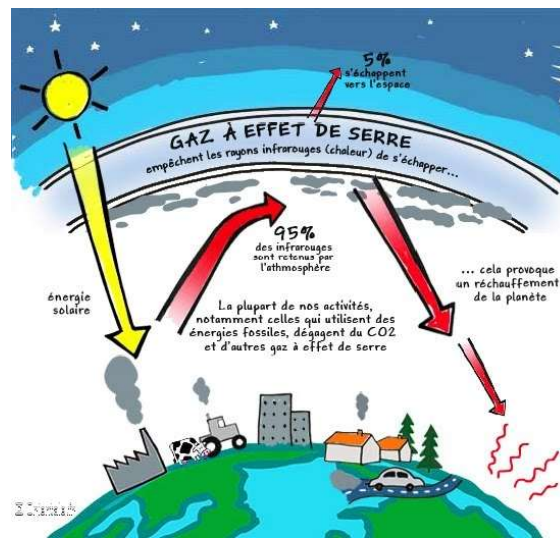


Figure 2 : l'effet de serre

2. Contribution spécifique du CO₂ dans le réchauffement global :

Le CO₂ est responsable de près de 75 % des émissions mondiales de GES d'origine anthropique. Depuis le début de l'ère industrielle, sa concentration est passée de 280 ppm (parties par million) à plus de 420 ppm aujourd'hui. Cette accumulation dans l'atmosphère entraîne un déséquilibre du bilan énergétique de la planète, provoquant une augmentation progressive de la température moyenne à la surface du globe. Le dernier rapport du GIEC (2023) confirme que le CO₂ est le principal moteur du réchauffement climatique observé depuis la fin du 19^e siècle

3. Conséquences environnementales :

Le réchauffement climatique induit par les émissions excessives de CO₂ entraîne une série d'impacts profonds et interconnectés :

- ❖ Fonte des glaciers et des calottes polaires : La hausse des températures accélère la fonte des glaces en Arctique, en Antarctique et dans les chaînes de montagnes, contribuant à l'élévation du niveau des mers. Ce phénomène menace les zones côtières et les petites îles.
- ❖ Acidification des océans : Environ 25 % du CO₂ émis par les activités humaines est absorbé par les océans. Cela modifie le pH de l'eau, entraînant une acidification

qui menace les écosystèmes marins, en particulier les coraux et les espèces calcaires (coquillages, plancton...).

- ❖ Tempêtes et ouragans plus violents : Le changement climatique, amplifié par l'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, provoque un réchauffement des océans, en particulier dans les zones tropicales. Or, la chaleur des eaux de surface est le carburant principal des tempêtes tropicales, ouragans et cyclones.
- ❖ Les Pluie torrentielles : Avec des températures plus élevées, l'évaporation de l'eau de mer s'accroît, ce qui fournit plus de vapeur d'eau à l'atmosphère. Cette humidité alimente des systèmes dépressionnaires puissants, augmentant la force des vents et des précipitations.
- ❖ Les ouragans deviennent plus intenses (catégories 4 ou 5) et peuvent parcourir de plus longues distances, leur vitesse de déplacement ralentit, ce qui fait qu'ils s'attardent plus longtemps sur les terres, aggravant les dégâts.

IV. Conclusion :

Le dioxyde de carbone (CO₂), bien qu'indispensable aux cycles naturels, est devenu l'un des principaux vecteurs du changement climatique en raison des activités humaines. Ce chapitre a mis en évidence ses propriétés, ses rôles écologiques et ses sources d'émissions anthropiques, soulignant l'urgence d'agir face à ses impacts croissants

Chapitre 2 : Méthodes de valorisation de CO₂

I. Introduction :

Dans un contexte de crise climatique et de transition énergétique, la valorisation du dioxyde de carbone (CO₂) apparaît comme une solution innovante et complémentaire aux stratégies de réduction des émissions. Plutôt que de considérer le CO₂ uniquement comme un rejet à stocker, il devient aujourd'hui une ressource exploitable pour produire des carburants, des matériaux, ou encore de la biomasse.

II. Valorisation du CO₂ :

Aujourd'hui, trois voies de valorisation sont distinguées pour l'utilisation du CO₂. Deux d'entre elles (valorisation biologique et chimique), concernent la transformation de la nature du CO₂ pour l'obtention de produits à haute valeur ajoutée. L'autre option considère l'utilisation directe de cette molécule à travers la valorisation physique, notamment dans l'industrie du pétrole. La Figure ci-dessous présente un résumé de ces voies :

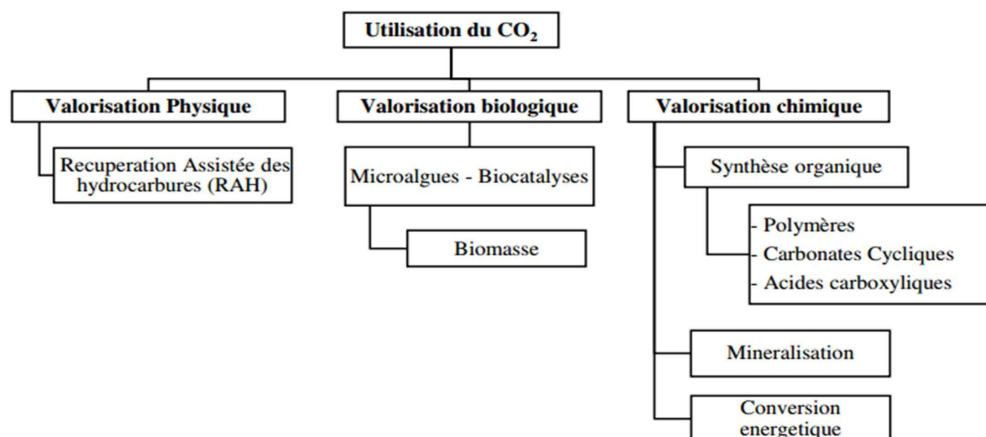


Figure 3 les voies de Valorisation

A l'heure actuelle, seulement 207 Mt/an de CO₂ sont utilisées par l'industrie chimique et environ 40 Mt/an par l'industrie pétrolière, ce qui représente environ 0,6% des émissions produites en CO₂. La plupart du CO₂ est destinée à la production d'urée, carbonates inorganiques et pigments. Néanmoins, au regard du potentiel économique

des voies de valorisation, ce chiffre devrait augmenter favorablement dans les prochaines années.

Les différentes options de valorisation de CO₂, ont été étudiées depuis quelques années et certaines d'entre elles, font déjà l'objet de développements industriels. C'est le cas de la récupération assistée des hydrocarbures (RAH) qui utilise la plupart du temps le CO₂ stocké de façon naturelle

Le potentiel de valorisation du CO₂ est porté surtout sur la voie chimique. Diverses applications peuvent conduire à l'obtention de produits comme les polycarbonates ou carbonates cycliques largement utilisés dans l'industrie de polymères. Cependant, la conversion de CO₂ en composés chimiques organiques implique généralement des réactions endothermiques ou de basse réactivité qui ont besoin de molécules hautement réactives ou de catalyseurs.

1. Valorisation physique :

Lorsque l'on considère la valorisation physique du CO₂, la molécule ne subit aucune transformation. Etant donné les propriétés physiques du CO₂, il peut être utilisé dans deux contextes différents : la récupération assistée des hydrocarbures (RAH) ou des applications industrielles (solvants ou boissons gazeuses par exemple).

1.1 Récupération assistée des hydrocarbures (RAH) :

La RAH consiste à injecter du CO₂ dans des conditions supercritiques dans les réservoirs de pétrole ou de gaz naturel pour améliorer l'extraction de ces derniers. Les propriétés physico-chimiques du CO₂ supercritique ($T > 31^{\circ}\text{C}$, $P > 74$ bars) permettent en effet de diminuer la viscosité du pétrole brut favorisant son extraction

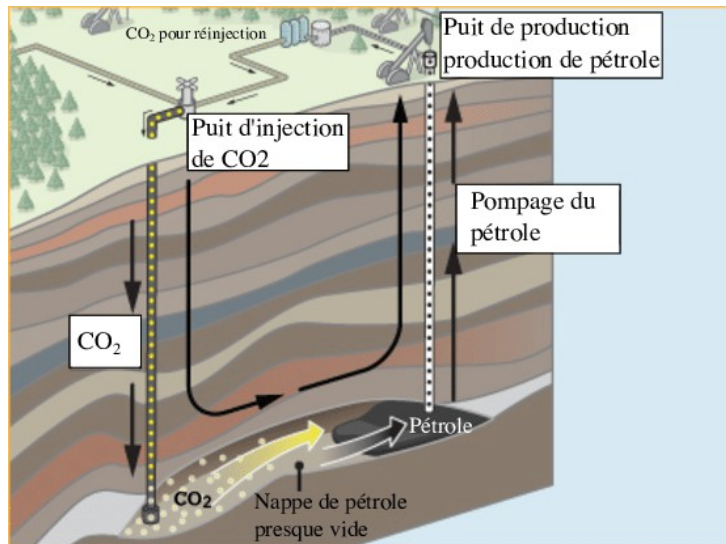


Figure 4 Principe de la RAH

L'utilisation de CO₂ pour la RAH existe depuis plusieurs années et permet d'augmenter le rendement d'extraction de 10 à 30%. La plupart du CO₂ utilisé dans ce procédé provient essentiellement de réservoirs naturels. Toutefois, la valorisation du CO₂ permettrait de réutiliser le CO₂ capté des fumées industrielles pour son implémentation dans la RAH sans complications majeures.

Entre 0,24 et 0,42 tonnes de CO₂ sont nécessaires pour la récupération d'un baril, ce qui représente environ 1,7 à 3,0 tonnes de CO₂ par tonne de pétrole. Aujourd'hui, il est estimé une consommation mondiale de CO₂ de l'ordre de 72 millions de tonnes par an pour la RAH (76% de ressources naturelles)

Cette application est majoritairement employée aux Etats Unis où en 2008, 56 millions de tonnes de CO₂ ont été utilisées, dont 83% proviennent de ressources naturelles.

1.2 Applications industrielles :

Le CO₂ requis pour les applications industrielles doit avoir une pureté assez élevée (99,99%), puisqu'il est utilisé notamment dans l'industrie agro-alimentaire ou comme réfrigérant. Il est utilisé étant donné ses propriétés physico-chimiques comme solvant et acide.

Dans cette alternative, l'utilisation du CO₂ issu de fumées industrielles présente certaines contraintes liées principalement aux niveaux de pureté requise dans l'industrie alimentaire et la possible modification des propriétés physico-chimiques par la présence des impuretés, lorsqu'il est utilisé comme réfrigérant.

2. Valorisation biologique :

Dans ce domaine, le captage et la valorisation du CO₂ peut être obtenu à partir des organismes photosynthétiques tels que les algues et microalgue. L'intérêt repose sur la production de biomasse avec un contenu important de protéines, de lipides et de cellulose. Les proportions de ces composés varient en fonction de l'espèce de microalgue utilisée. La biomasse est alors utilisée dans différentes applications :

- ❖ Produit à haute valeur ajoutée : polymères, isocyanates, fibres, plastiques, nourriture animale, pesticides.
- ❖ Biocarburants : biodiésel ou éthanol.
- ❖ Traitement de l'eau.

3. Valorisation chimique :

L'utilisation du CO₂ comme réactif chimique est un champ d'étude assez important. Le grand nombre des possibilités de transformation de CO₂ constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la recherche. Le principe consiste à synthétiser des molécules à haute valeur ajoutée en partant d'une molécule très stable thermodynamiquement.

La conversion du CO₂ peut avoir lieu à partir de deux principes :

- Le premier principe repose sur la fonctionnalisation de la molécule de CO₂, c'est-à-dire la création de nouvelles liaisons covalentes (C–O, C–N, C–C) entre le CO₂ et d'autres molécules. Cette approche ne vise pas à réduire le CO₂, mais à l'**activer chimiquement** afin de le faire réagir et former des composés utiles. Le dioxyde de carbone devient ainsi une brique de base pour la synthèse de nouvelles molécules organiques.
- La seconde consiste en la réduction chimique vers des états plus riches en énergie. c'est-à-dire que le CO₂ **gagne des électrons**, pour former des composés **plus riches en énergie** comme des carburants ou des intermédiaires chimiques.

La fonctionnalisation présente l'avantage d'utiliser l'apport énergétique provenant des espèces chimiques qui réagissent avec le CO₂ et non de sources externes contrairement à la valorisation par réduction chimique. Dans cette première catégorie, il est possible de trouver notamment la synthèse organique et la minéralisation.

Les principaux procédés utilisés pour obtenir ces produits, sont l'électro- réduction, la photo réduction ou des technologies telles que l'énergie thermique, solaire ou les plasmas. Le défi est de trouver les moyens appropriés pour la génération d'énergie et de réduire les coûts associés à la production.

En revanche, quelques exemples de fonctionnalisation consistent à synthétiser des produits commercialisables tels que les carbamates, carboxylates, carbonates cycliques, polycarbonates, etc.

Une brève description des alternatives de transformation chimique regroupées en trois catégories est présentée ci-après : conversion par réduction chimique, fonctionnalisation par minéralisation et par synthèse chimique.

3.1 Réduction chimique de CO₂ :

Dans cette alternative, la transformation du CO₂ est obtenue par l'apport d'une quantité d'énergie externe, telles que l'énergie thermique, électrique ou photonique. Cette énergie permet la conversion du CO₂ en d'autres molécules hydrocarbonées, ayant des états plus riches en énergie, il s'agit dans ce cas de réactions endothermique

3.1.1 Fonctionnalisation par minéralisation :

La minéralisation concerne la production de carbonates inorganiques par conversion chimique du CO₂ à partir d'une réaction de carbonatation. Afin que la réaction puisse avoir lieu, des composés tels que des oxydes alcalino-terreux (CaO, MgO), ou des sels (NaCl, CaCl) sont utilisés comme réactifs. L'intérêt de cette voie repose sur la réutilisation éventuelle des résidus des industries cimentières, minières et/ou énergétiques pour l'obtention des réactifs principaux ainsi qu'à la capacité de valorisation du CO₂.

3.1.2 Fonctionnalisation par synthèse organique :

Dans cette branche la production de composés organiques est le résultat d'une réaction chimique avec le CO₂ généralement en présence d'un catalyseur. A ce jour, il existe déjà des procédés de synthèse organique à l'échelle industrielle qui utilisent le CO₂ comme matière première. C'est le cas des procédés de production d'urée et d'acide salicylique, environ 207 Mt/an de CO₂ (environ 0,63% des émissions mondiales de CO₂), sont utilisées principalement dans la production d'urée, d'acide salicylique et de carbonates inorganiques. L'urée par exemple, est un composé particulièrement attractif dans la production de fertilisants et dans l'industrie des moteurs.

Bien que les productions d'urée et d'acide salicylique soient très importantes, l'état d'exploitation actuel très développé de ces deux filières et le potentiel de croissance vis-à-vis de la capacité de valorisation du CO₂, sont limités. Ceci est dû à la saturation des marchés qui existe depuis plus de 100 ans, dont les possibilités d'exploitation sont presque épuisées.

III. Conclusion :

La valorisation du dioxyde de carbone représente une solution prometteuse face aux enjeux environnementaux actuels. Plutôt que de considérer le CO₂ comme un simple déchet, il devient une ressource valorisable à travers trois grandes voies : physique, biologique et chimique.

La valorisation physique reste limitée à des usages industriels, tandis que la voie biologique, encore en développement, offre des perspectives intéressantes via la production de biomasse. C'est surtout la valorisation chimique qui présente un fort potentiel, malgré les défis techniques et énergétiques qu'elle implique.

Chapitre 3 : La Séquestration de CO₂ dans les formations géologiques

I. Introduction :

La séquestration géologique du dioxyde de carbone (CO₂) est une technologie clé dans la lutte contre le changement climatique. Elle permet de capter le CO₂ et de le stocker de manière sûre dans des formations géologiques profondes, empêchant ainsi son émission dans l'atmosphère.

Problématique : Quelles formations géologiques les plus adaptées à la séquestration du CO₂, et quelles sont leurs caractéristiques en termes de mécanismes de piégeage et de durabilité ?

II. Les formations géologiques adaptées à la séquestration de CO₂ :

1. La séquestration de CO₂ dans les Aquifères Salins Profonds :

Les aquifères salins profonds sont des régions géologiques saturées d'eau très salée, inutilisable pour l'agriculture ou la consommation. Tout comme les réservoirs d'hydrocarbures, les aquifères sont des sites de stockage naturels, puisqu'ils confinent des fluides sur des périodes géologiques. Ces formations sont donc composées d'une roche réservoir, suffisamment poreuse et perméable pour faciliter l'injection et confinée par une roche de couverture. Leur nombre et leur présence aussi bien continentale que maritime font qu'elles peuvent être proches des lieux d'émission de gaz.

1.1 Les différents mécanismes de piégeage du CO₂ au sein d'un aquifère :

1.1.1 Le piégeage résiduel :

Le premier d'entre eux débute lors de l'injection. En effet, le dioxyde de carbone est alors sous forme supercritique et forme une bulle dans l'aquifère. Sa densité est légèrement inférieure à celle de l'eau de formation. Il va donc remonter vers le haut du

réservoir par flottaison et en suivant les chemins de plus haute perméabilité. Une partie du CO₂ va alors remplir la porosité de la matrice rocheuse et rester piégée par capillarité : c'est le piégeage de CO₂ résiduel.

1.1.2 Le piégeage structurel :

Le dioxyde de carbone continue son ascension jusqu'à être stoppé par la roche de couverture. C'est le piégeage structurel et stratigraphique, qui a lieu rapidement après l'injection et permet de stocker une partie significative du fluide (Bradshaw et al., 2007). Le volume de CO₂ piégé de cette manière dépend beaucoup de la structure de l'aquifère, et deux cas principaux sont à distinguer :

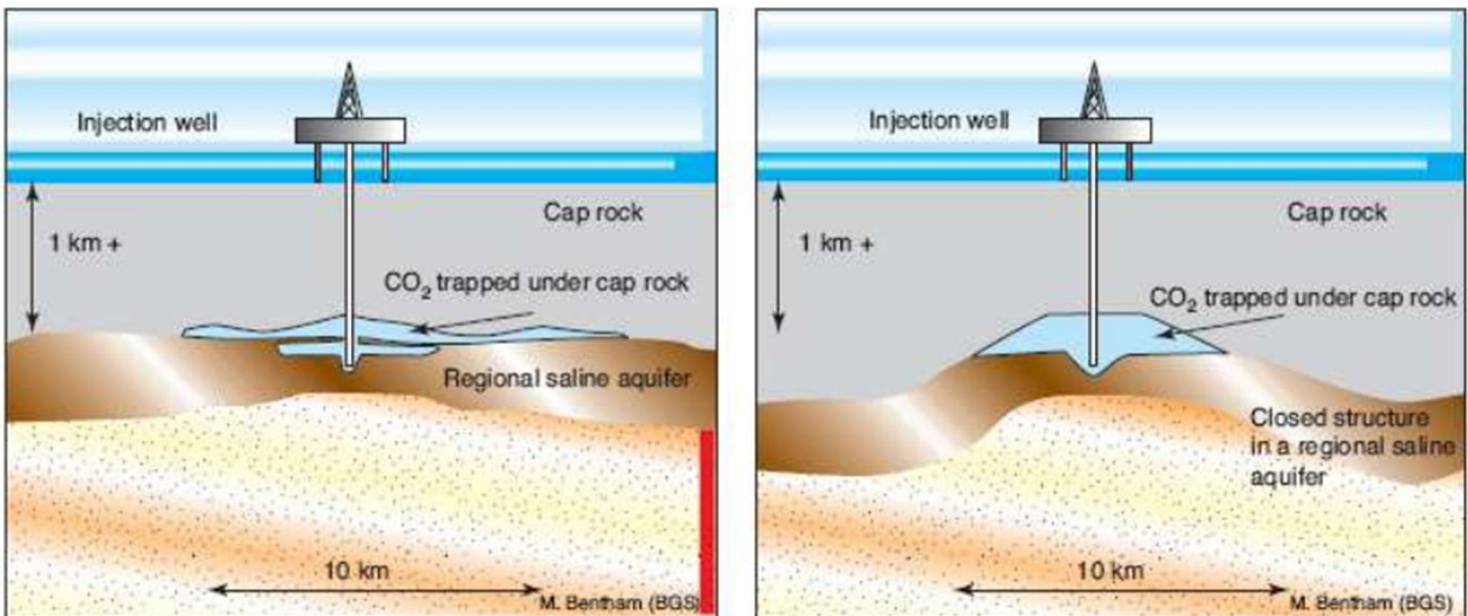


Figure 5 Figure : a. Stockage « ouvert » à gauche, b. Stockage « fermé » à droite (Bentham et Kirby, 2005)

Dans le premier, que nous appellerons stockage « fermé », la roche de couverture forme un dôme, comme dans le cas d'un anticlinal. Une très grande partie de la bulle reste alors immobile sous le pli et la quantité de CO₂ stockée par piégeage structurel est importante.

Le second cas correspond à un stockage « ouvert », où la roche de couverture ne forme pas particulièrement une structure fermée. Une fois que la bulle de CO₂ a atteint la roche imperméable, elle va être entraînée latéralement par l'écoulement

de l'aquifère et se répartir sur des distances qui peuvent être grandes. Cet effet hydrodynamique améliore souvent les précédents mécanismes physiques ou chimiques de piégeage. En effet, le dioxyde de carbone va occuper les différentes plissures et ondulations de la couverture pour former des petites bulles de fluide supercritique.

2. La séquestration de CO₂ dans les couches de sels :

2.1 Définition des formations salines :

Les formations salines sont des structures géologiques constituées principalement de minéraux évaporitiques, principalement l'halite (NaCl), parfois du gypse (CaSO₄·2H₂O) ou de l'anhydrite (CaSO₄). Ces formations se sont constituées au cours des âges géologiques par évaporation massive d'anciennes mers ou lacs dans des environnements arides.

On distingue deux grandes formes géologiques salines :

- ❖ Les couches salines stratifiées : dépôts horizontaux plus ou moins continus.
- ❖ Les dômes salins : structures en forme de dôme créées par la remontée plastique du sel plus léger à travers des roches sus-jacentes.

Ces formations sont souvent enfouies sous des centaines à des milliers de mètres de sédiments.

2.2 Les propriétés physiques et chimiques de sel :

Propriété	Description	Importance pour le stockage du CO ₂
Faible perméabilité	Le sel est quasi-imperméable aux fluides et aux gaz grâce à sa structure cristalline compacte.	Réduit considérablement le risque de fuite du CO ₂ ; agit comme une barrière naturelle ("cap rock").
Plasticité et capacité d'auto-cicatrisations	Sous haute pression et température, le sel se déforme plastiquement sans se fracturer. Les fissures sont refermées naturellement par l'écoulement des cristaux sous pression litho statique.	Assure la restauration de l'étanchéité et maintient la stabilité du stockage à long terme.

Propriété	Description	Importance pour le stockage du CO ₂
Stabilité chimique	Le sel est chimiquement inerte face au CO ₂ dans les conditions de stockage (haute pression, température modérée).	Pas de réactions chimiques nuisibles qui pourraient fragiliser la structure de confinement.

2.3 Principes de la séquestration de CO₂ dans les formations salines :

La séquestration du CO₂ dans les formations salines repose sur plusieurs principes géologiques et technologiques. L'idée générale est de piéger le CO₂ dans des structures naturelles qui assurent une étanchéité durable, empêchant le gaz de s'échapper vers l'atmosphère. Les principales méthodes utilisées sont l'injection de CO₂ dans des cavernes salines créées par dissolution du sel ou le stockage dans des réservoirs sous des couches de sel compact.

2.3.1 Processus d'Injection de CO₂ dans les Cavernes Salines :

2.3.1.1 Création de cavernes salines :

L'injection de CO₂ dans des cavernes salines repose sur un processus de **dissolution du sel** dans l'eau pour créer des **cavernes souterraines**. Ce processus peut être réalisé en plusieurs étapes :

- ❖ Injection d'eau dans les formations salines : L'eau est injectée dans les couches salines pour dissoudre le sel et créer une cavité souterraine.
- ❖ Création de cavernes de stockage : Une fois la caverne formée, elle peut être utilisée pour stocker des gaz comme le CO₂. Le sel dissous dans l'eau crée une barrière presque étanche autour de la cavité.

2.3.1.2 Injection du CO₂ :

Une fois la caverne formée, le **CO₂** peut être injecté sous forme **gazeuse** ou **supercritique** (une phase entre liquide et gaz qui se produit à des pressions et températures élevées).

Les propriétés physiques du CO₂ dans cet état permettent de **l'injecter dans des espaces confinés** sous pression tout en restant sous forme stable. Le CO₂ injecté dans la caverne reste piégé par la faible perméabilité du sel et la pression élevée qui empêche toute fuite.

III. Conclusion :

La séquestration géologique du CO₂ constitue une solution prometteuse pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre à grande échelle. Parmi les différentes formations géologiques étudiées, les aquifères salins profonds et les formations salines présentent des conditions particulièrement favorables pour un stockage sûr et durable du dioxyde de carbone.

Les aquifères salins profonds offrent un vaste potentiel de stockage grâce à leur large distribution, leur porosité élevée et la présence de roches de couverture imperméables. Le piégeage y repose sur plusieurs mécanismes complémentaires (résiduel, structurel, dissolution, minéralisation), garantissant la rétention progressive du CO₂ sur des périodes géologiques.

De leur côté, les formations salines – notamment les couches et dômes de sel – offrent une barrière géologique quasi-parfaite grâce à leur faible perméabilité, leur stabilité chimique, et surtout leur capacité d’auto-cicatrisation. L’injection du CO₂ dans des cavernes salines artificielles, créées par dissolution du sel, constitue une autre voie efficace de confinement, particulièrement en raison de l’étanchéité naturelle offerte par le sel.

En conclusion, la réussite de la séquestration du CO₂ repose sur une bonne caractérisation géologique, le choix adapté du site, ainsi qu’une surveillance continue. Ces techniques, déjà mises en œuvre à grande échelle comme dans le projet Sleipner en mer du Nord, démontrent la faisabilité technique de la séquestration du CO₂ dans des environnements géologiques variés, tout en assurant un haut niveau de sécurité environnementale.

Chapitre 4 : Etude de Cas : Projet de séquestration de CO₂ de Sleipner (Norvège)

I. Injection, stockage et surveillance à Sleipner (Norvège)

1 Localisation de champ de Sleipner (Norvège) :

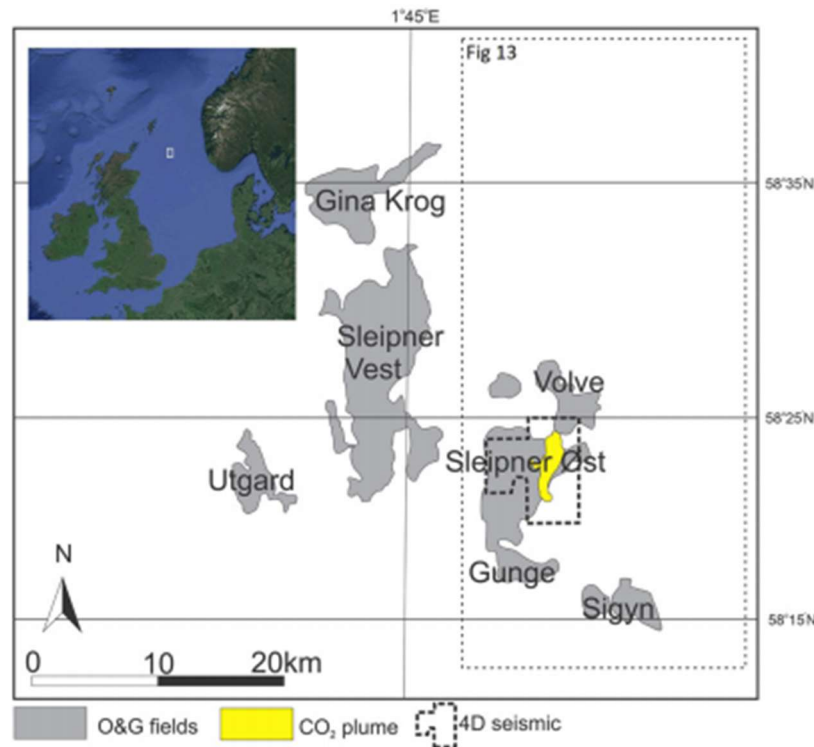


Figure 6: Localisation de Sleipner Vest, Sleipner Øst et des champs voisins, près de la frontière entre la Norvège et le Royaume Uni.

Quelques remarques :

Le panache de CO₂ se trouve à environ 1300 m au-dessus du réservoir de Sleipner Øst et est représenté par un polygone jaune. Le polygone en pointillés noirs indique l'étendue de l'acquisition sismique répétée de 2020.

2. Histoire de projet :

L'histoire de Sleipner débute avec la décision du Gouvernement norvégien, sous la direction de Gro Harlem Brundtland, d'imposer, en 1991, une taxe pour émissions de CO₂ aux opérateurs offshore. Cette décision prend sa source dans le rapport des Nations Unies « Our Common Future » (1987) produit par la Commission Brundtland. Cette référence fixe le cadre économique et politique menant aux critères de conception du

projet du champ gazier de Sleipner. Le développement commercial du champ de Sleipner a commencé en 1986, et s'est déroulé en deux phases : Sleipner Est mis en production en 1993, suivi par Sleipner Ouest, en septembre 1996.

En raison du taux élevé en CO₂ du champ de Sleipner Ouest, un champ qui retenait environ 200 GSm³ de gaz contenant entre 4 et 9,5% de CO₂ selon le bloc faillé, la décision a été prise d'extraire et d'injecter le CO₂ en profondeur. Statoil, opérateur, ainsi que les partenaires Esso, Norsk Hydro, Elf et Total (Total aujourd'hui) ont évalué plusieurs options avant de parvenir à la conception finale du système. On prévoyait de produire environ 1 Mt de CO₂ par an soit un total de 20 Mt, en parallèle de la production de gaz à partir des 18 puits de développement prévus. Si ce volume de CO₂ avait été relâché dans l'atmosphère, le total des émissions de CO₂ de Norvège aurait augmenté de 3%. Ce sont donc à la fois une sensibilisation environnementale croissante aux émissions de GES et la taxe de 350 NOK (environ 55 US\$) par tonne de CO₂ émise qui ont conduit à la décision de capter et stocker le CO₂ en profondeur

3. Conception du projet :

Plusieurs options d'utilisation du CO₂ ont été étudiées avant de parvenir à la solution retenue :

- récupération assistée de pétrole dans les champs voisins de la mer du Nord ; solution rejetée en raison de l'inadéquation entre les volumes de CO₂ requis et les volumes de CO₂ offerts (CO₂ insuffisant pour la rentabilité économique de l'EOR³)
- amélioration de la récupération de gaz à condensats dans la Formation Heimdal à Sleipner Est en injectant un mélange CO₂/gaz sec lors de la phase de recyclage. De cette façon le CO₂ serait in fine stocké dans la Formation Heimdal. Toutefois, le risque de contamination des hydrocarbures de Sleipner Est par le CO₂ a été considéré comme trop grand et cette solution n'a pas été retenue.

Cette situation conduisait à ne considérer comme option viable que le stockage en aquifères salins vierges.

Dans cette perspective, deux formations salines étaient envisageables : la Formation d'Utsira dont le toit du sable se trouvait à environ 800 m de profondeur et la Formation Skagerrak dont le toit du sable se situait à environ 2 500 m de profondeur. C'est

finalement la Formation Utsira qui a été choisie en raison de sa profondeur plus faible, de coûts moindres pour le puits et les équipements, d'une excellente qualité du grès et d'une large extension latérale, permettant une capacité de stockage considérable.

Les risques identifiés à l'époque étaient liés :

- à la nature peu consolidée des roches de la Formation Utsira
- au comportement du CO₂ dans des conditions surcritiques rencontrées aux profondeurs et températures de la Formation Utsira. Ces deux facteurs se sont révélés importants et de nombreux travaux de recherche leur ont été consacrés

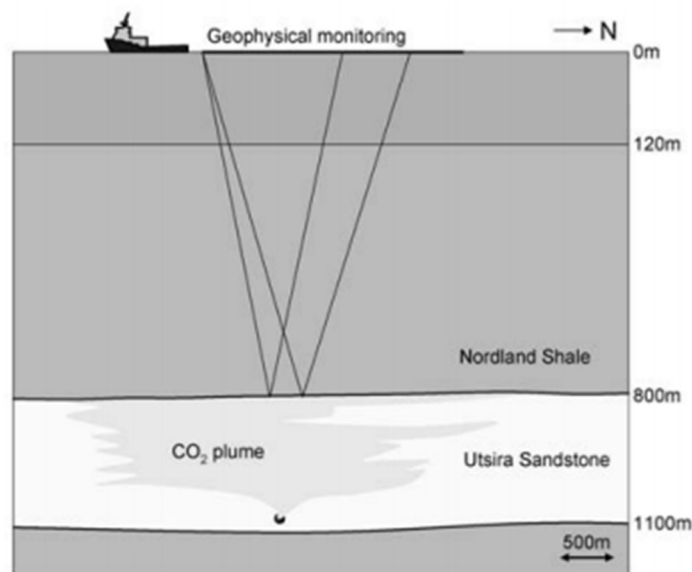


Figure 7: Le site de stockage de Sleipner montrant la distribution approximative du panache de CO₂, en 2008, sur la base de données sismiques time-lapse3 (document Statoil).

Pour le captage et la compression du CO₂ en vue du stockage en profondeur, il a été décidé, sur une plateforme spécifique dédiée (plate-forme T de Sleipner), de mettre en place une installation d'extraction de CO₂ par un procédé aux amines et une installation de compression. L'objectif était de réduire le contenu en CO₂ du gaz de 9 à 2,5%, conformément à la qualité requise pour le gaz d'exportation. Une amine tertiaire (MDEA) a été choisie comme catalyseur pour extraire le CO₂ du flux de gaz dans un dispositif d'adsorption à haute pression et basse température. La régénération du CO₂ à partir de l'amine-CO₂ intervient à haute température (régénération flash), l'amine étant recyclée et la chaleur en excès étant utilisée au moyen d'un échangeur de chaleur. Le

CO₂ est ensuite comprimé en quatre étapes afin d'atteindre une pression de 65 bars en tête de puits d'injection. Une description complète de l'installation et de son fonctionnement est donnée dans Hansen et al. (2005).

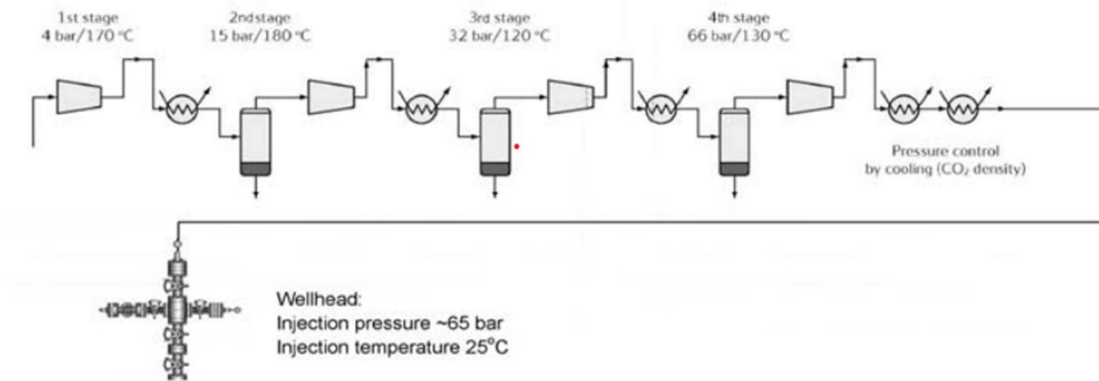


Figure 8: Schéma du processus de compression du CO₂ à Sleipner (document Statoil).

Le puits d'injection de CO₂, 15/9-A16, est un puits horizontal de 83° par rapport à la verticale et un intervalle perforé pour l'injection de 38 m, le sommet de l'intervalle étant à 1 010 m TVD MSL (Hansen et al., 2005). Le puits a été conçu pour être robuste de façon à minimiser les besoins d'intervention durant la période d'injection. Pour le tubage d'injection en 7 pouces et les parties exposées du casing de puits en 9 et 5/8 de pouce, on a utilisé de l'acier inoxydable à forte teneur en chrome (25% Cr), de manière à prévenir la corrosion. Les problèmes initiaux d'injection dus à des entrées de sable ont été résolus par de nouvelles perforations sur l'intervalle d'injection et l'installation de packs de sable et gravier. Les débits d'injection ont été stabilisés à 1,5 MSm³ et les pressions en tête de puits à 65 bars, permettant le stockage réussi de presque tout le CO₂ capté.

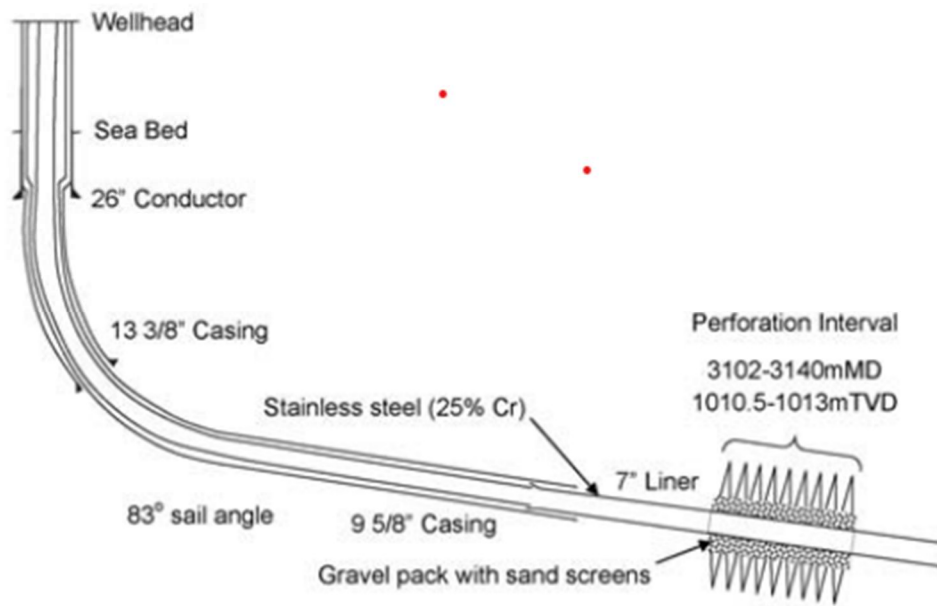


Figure 9 : Conception du puits d'injection de CO₂ à Sleipner

4. Surveillance et modélisation du réservoir :

Afin de suivre le fonctionnement et l'intégrité à long terme du site de stockage, un programme étendu de surveillance géophysique a été mis en place. Les propositions initiales d'installer des puits de surveillance n'ont pas été retenues en raison de leur coût et des risques associés aux opérations de forage et de puits. Les options géophysiques se sont avérées très pertinentes pour un coût adapté.

4.1 Observations globales de la surveillance sismique :

- Surveillance sismique répétée (time-lapse) : depuis le début de l'injection, un total de 10 campagnes sismiques 3D répétées ont été réalisées, aux années suivantes : 1999, 2001, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2013, ...

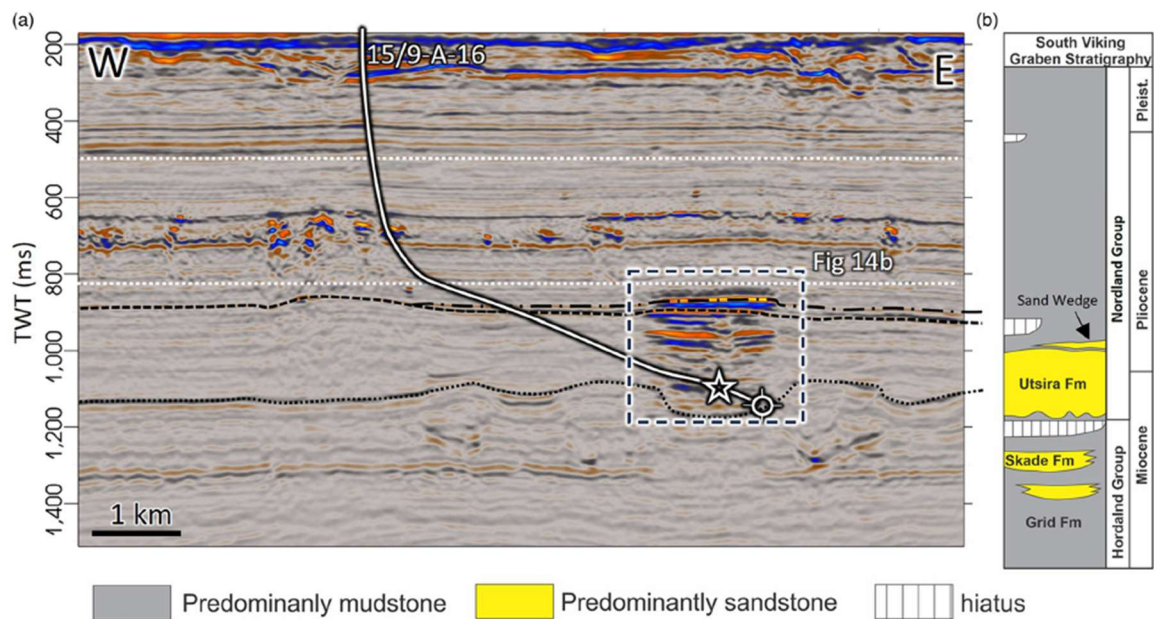


Figure 10 : Coupe sismique en ligne croisée passant par le point d'injection, issue de la campagne de surveillance sismique de 2020.

Quelques remarques :

Quelques remarques sur la figure :

- Les amplitudes rouges/jaunes correspondent à une diminution de l'impédance acoustique (réponse "souple").
- Le trajet du puits d'injection est tracé en blanc, avec une étoile indiquant l'intervalle de perforation.
- Les lignes noires indiquent respectivement :
 - *le sommet du Sand Wedge (pointillé-trait)
 - *le sommet de la formation d'Utsira (pointillé)
 - *la base de la formation d'Utsira (pointillés fins)
- Interprétation Sismique :

Les données de surveillance ont identifié de façon claire l'apparition du CO₂ sur les données sismiques et gravimétriques. Les changements d'amplitude sismique observés, liés au CO₂, proviennent uniquement de la formation d'Utsira, ce qui confirme que le CO₂ injecté est bien resté piégé dans la formation de stockage et n'a pas fui au travers de la roche couverture. En outre, les données de sismique répétée (time-lapse) ont montré les effets plus précis de subdivisions lithologiques intra formation Utsira. On sait maintenant que cette formation sableuse se compose de 9 unités séparées par de minces intercalations de shales, sous lesquelles le CO₂ est retenu jusqu'à ce qu'un niveau de shale soit percé ou qu'un hiatus dans le niveau soit rencontré. Le CO₂ migre ensuite d'un niveau à l'autre pour aboutir à un système complexe à plusieurs étages. L'extension maximale du panache de CO₂ se trouve maintenant au niveau le plus élevé (niveau 9), mais ce système multi-niveau a montré une efficacité de stockage plus grande que celle que l'on aurait obtenu avec une unité sableuse homogène.

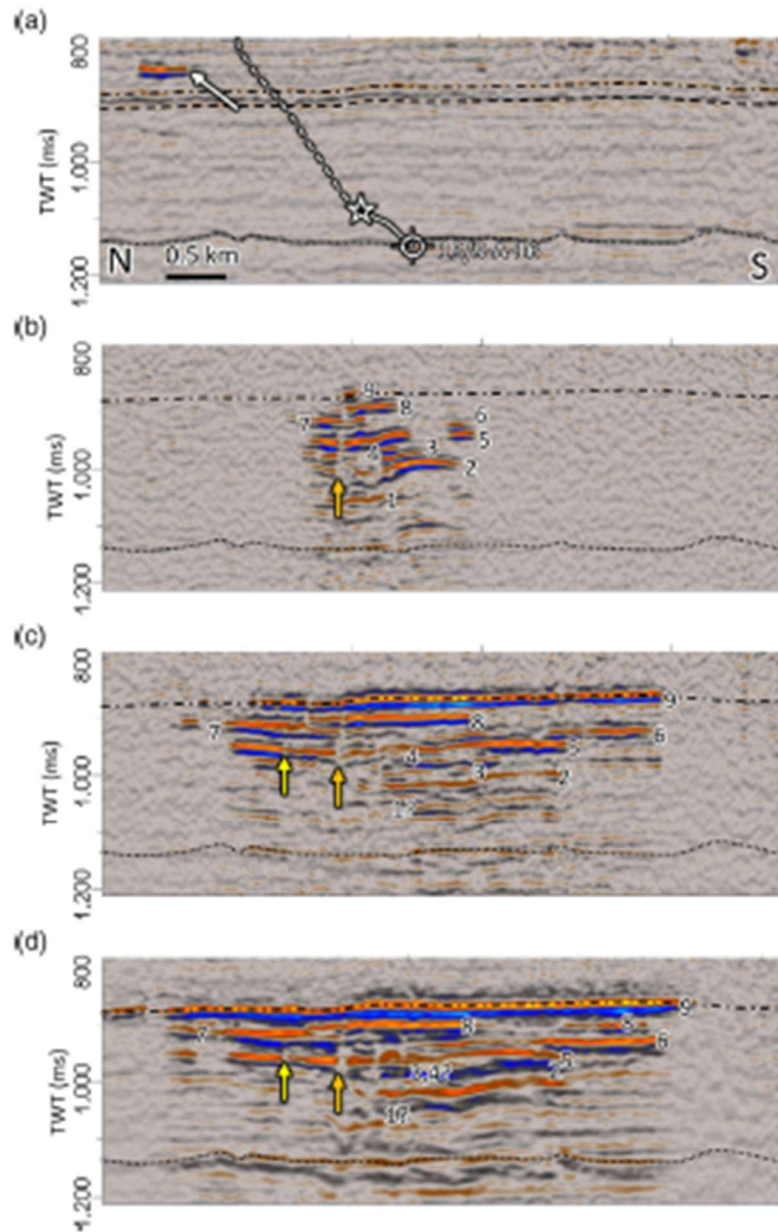


Figure 11: Coupes sismiques arbitraires à travers la partie principale du panache de CO₂, du S-SO vers le N-NE **(a)** Sismique de référence (1994), **(b)** Différence sismique entre 1999 et 1994, **(c)** Différence sismique entre 2010 et 1994, **(d)** Différence sismique entre 2020 et 1994.

Quelques remarques sur la figure :

- Le puits d'injection 15/9-A-16, orienté O-E, est projeté en blanc sur la coupe (a), et l'intervalle de perforation est indiqué par une étoile.

- Les chiffres noirs font référence aux anomalies.
- Les flèches blanches, orange et jaunes indiquent respectivement les anomalies dans la surcouche et les cheminées sismiques discutées dans le texte.

Lors de la première acquisition sismique répétée en 1999, neuf anomalies d'amplitude distinctes ont été observées, chacune constituée de paires de réflexions jaunes et bleues, correspondant respectivement à la réponse douce (sommet) et à la réponse dure (base) de couches présentant une réduction d'impédance acoustique.

Ces anomalies ont été interprétées comme du CO₂ piégé sous différentes couches d'argile, notamment :

- au sommet du Sand Wedge,
- sous une mudstone de 5 à 9 m d'épaisseur,
- et sous plusieurs fines couches d'argile à l'intérieur de la Formation d'Utsira.

Dans chaque cas, le changement de réflectivité est dû à un contraste d'impédance doux entre un grès saturé en CO₂ et des grès ou mudstones saturés en saumure.

les anomalies 8 et 9 correspondants respectivement au CO₂ piégé sous la mudstone de 5–9 m et dans le Sand Wedge

Avec le temps, il est devenu de plus en plus difficile de distinguer les réflexions, en particulier dans la partie centrale du panache, où les réflexions plus profondes se sont affaiblies, comme on peut le voir en comparant les réflexions 1, 2, 3 et 4 entre 1999 (et leurs expressions en 2010 et 2020

Un couloir vertical d'atténuation d'amplitude a été observé dès le premier suivi en 1999 Cette observation, appelée « cheminée de CO₂ », est interprétée comme un conduit d'écoulement vertical où toute la colonne de sable est fortement saturée en CO₂. En vue cartographique, elle apparaît comme une structure circulaire d'environ 130 m de large, au sein d'une zone par ailleurs fortement réfléchissante. Elle est plus large à la base et plus étroite vers le sommet. La cheminée de CO₂ est toujours visible dans les données de 2020, bien que sa morphologie ait évolué.

La plupart des anomalies d'amplitude se sont initialement développées de façon allongée selon une direction SSO–NNE, par exemple les anomalies 6, 5 et 4, alors que d'autres étaient plus concentrées autour du point d'injection, comme les anomalies 1,3. Certaines de ces anomalies ont fini par fusionner avec l'anomalie principale, d'autres sont restées distinctes.

5. Aperçu sur la capacité et l'intégrité du stockage :

Une des questions qui a reçu beaucoup d'attention dans le développement de la technologie CCS est la capacité ultime de stockage d'un aquifère salin ou de roches pétrolières, réservoirs potentiels. L'expérience de Sleipner fournit des limites importantes pour ces estimations. Les estimations initiales d'environ 50 Gt, présentées par Holloway et al. (1987), ont été révisées à la baisse au fur et à mesure que l'appréciation des facteurs clefs contrôlant l'efficacité du stockage devenait plus mature. Une estimation publiée plus récemment, dérivant du projet Geocapacity (2009), réduit les estimations antérieures de stockage à l'échelle de l'Europe, mais ne précise pas la capacité de stockage des formations géologiques individuelles. Si l'on applique proportionnellement la baisse des estimations précédentes aux chiffres donnés dans le programme GESTCO pour les formations géologiques individuelles, la capacité de stockage de la formation Utsira s'établit alors à environ 6,3 Gt.

II. Conclusion :

Le projet Sleipner a permis de démontrer la faisabilité technique du stockage de CO₂ dans un aquifère salin profond (Formation Utsira), avec une bonne **intégrité du stockage** et un suivi efficace par **sismique répétée**. L'expérience acquise a mis en évidence les **facteurs limitant la capacité réelle de stockage**, notamment la stratification interne du réservoir et la migration du CO₂ dans des structures complexes. Les estimations initiales de capacité (50 Gt) ont été **révisées à la baisse** à environ **6,3 Gt**, illustrant l'importance de **modélisations précises** pour les futurs projets de captage et stockage du carbone (CCS).

Conclusion générale :

La lutte contre le changement climatique impose aujourd'hui une transformation profonde de nos modes de production et de consommation de l'énergie. Parmi les solutions envisagées pour atténuer les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), la **valorisation** et la **séquestration géologique** représentent deux approches complémentaires et prometteuses.

La **valorisation du CO₂**, par son intégration dans des processus industriels (production de carburants synthétiques, minéralisation, valorisation en matériaux ou en produits chimiques), offre une perspective de circularité du carbone. Toutefois, elle reste encore limitée par des contraintes technologiques, économiques et énergétiques, et ne permet pas à elle seule de traiter des volumes massifs de CO₂.

C'est dans ce contexte que la **séquestration géologique** prend tout son sens, en particulier dans des **formations géologiques profondes** comme les aquifères salins, les réservoirs d'hydrocarbures épuisés ou les veines de charbon. Ces formations permettent de stocker durablement, voire définitivement, le CO₂ dans le sous-sol. L'exemple emblématique du **projet Sleipner**, en mer du Nord, démontre la faisabilité technique, la sécurité à long terme et la viabilité économique d'un tel procédé à l'échelle industrielle. Depuis 1996, Sleipner injecte chaque année environ un million de tonnes de CO₂ dans un aquifère salin, prouvant ainsi la stabilité du stockage et l'efficacité du suivi géophysique.

En conclusion, combiner des **stratégies de valorisation du CO₂** avec une **séquestration dans les formations géologiques profondes** constitue une voie réaliste et scientifiquement fondée pour réduire l'empreinte carbone mondiale. Toutefois, une généralisation à grande échelle nécessite un **soutien politique fort**, des **investissements importants** et une **sensibilisation du public**. L'avenir de la gestion du CO₂ dépendra de notre capacité à intégrer ces solutions dans une approche globale de transition énergétique durable.

Bibliographie

Ringrose, P., Eiken, O. et Hermanrud, C. (2010). *Injection, stockage et surveillance à Sleipner (Norvège) : une rétrospective de 15 ans*. **Géologues**, n°166, pp. 69-74.

Furre, A.-K., Warchoř, M. J., Alnes, H., & Pontén, A. S. M. (2024). *Sleipner 26 years: How well-established subsurface monitoring work processes have contributed to successful offshore CO₂ injection*. *Geoenergy*, **2**, Article geoenergy2024-015.

Bachaud, P. (2010). *Stockage du CO₂ dans les aquifères profonds : Étude en conditions réelles des propriétés de confinement des roches de couverture et de leur altération* [Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine]. École doctorale RP2E, Laboratoire Réaction et Génie des Procédés.