



# Cap décarbonation

.....  
**CONCERTATION PRÉALABLE**  
**du 22 mai au 21 juillet 2023**

## Fiche d'information

# La séquestration du CO<sub>2</sub>

Au travers de trois projets complémentaires, la Phase 2 du Programme K6 sur la cimenterie de Lumbres, le projet CalCC sur l'usine de production de chaux de Réty et le projet D'Artagnan avec les canalisations de transport de CO<sub>2</sub> et le terminal sur le Port de Dunkerque, EQIOM, Lhoist (Chaux et Dolomies du Boulonnais), Air Liquide France Industrie, Dunkerque LNG et RTE sont engagés dans Cap décarbonation, une démarche commune de décarbonation de l'industrie.

Les partenaires interviennent à une ou plusieurs étapes de cette démarche, à savoir le captage du dioxyde de carbone sur les sites émetteurs, son transport et sa préparation en vue de son transfert maritime.

La séquestration est l'étape finale pour le dioxyde de carbone capté à Lumbres et à Réty. Cette étape, intervenant à l'étranger, ne relève pas de la compétence des partenaires de Cap décarbonation.

Cette fiche d'information est une compilation d'un ensemble de sources bibliographiques externes présentant les enjeux de la séquestration de CO<sub>2</sub>.

## Le principe de la séquestration du CO<sub>2</sub>

La séquestration correspond à l'injection du CO<sub>2</sub>, préalablement capté, dans le sous-sol. Il est possible de réaliser la séquestration onshore (sur terre) ou offshore (en mer, sous les fonds marins).

**Onshore ou offshore, deux grandes options de séquestration sont possibles.**

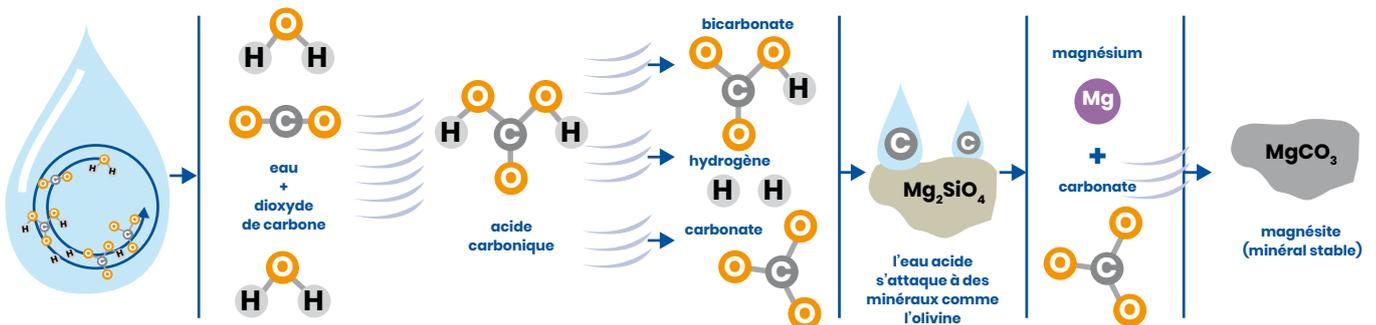
**La première consiste à injecter le CO<sub>2</sub> dans d'anciens réservoirs d'hydrocarbures.** Pendant des millions d'années, ces réservoirs ont stocké des hydrocarbures, sans la moindre fuite vers la surface et ils seraient tout à fait aptes à séquestrer demain du dioxyde de carbone. Plusieurs États du nord de l'Europe – la Norvège, le Royaume-Uni, les Pays-Bas – qui ont exploité les ressources en hydrocarbures de la mer du Nord développent aujourd'hui des projets de séquestration de CO<sub>2</sub>.

**La seconde option consiste à injecter le CO<sub>2</sub> dans des formations salines profondes.** Il s'agit de roches sédimentaires saturées d'eau qui contiennent des sels dissous en forte concentration. Très répandues, les formations salines renferment de grandes quantités d'eau impropre à l'agriculture ou

à la consommation humaine. Dans ces formations salines profondes, le CO<sub>2</sub> va se minéraliser. De façon simplifiée, le processus de minéralisation du CO<sub>2</sub> est le processus inverse de la décarbonatation du calcaire. La décarbonatation du calcaire consiste à « casser » la roche pour obtenir d'une part de la chaux vive (CaO, oxyde de calcium) et d'autre part du CO<sub>2</sub>, tandis que la minéralisation consiste à lier du CO<sub>2</sub> à des roches non-carbonatées présentes dans le sous-sol. Ce phénomène implique des réactions chimiques successives entre le CO<sub>2</sub>, dissous dans l'eau, et les minéraux, sur plusieurs centaines d'années (voir ci-contre).

Une fois la minéralisation terminée, le CO<sub>2</sub> est **définitivement séquestré sous forme solide**: il faudra le chauffer comme dans un four cimentier ou dans un four à chaux pour qu'il rejoigne à nouveau l'atmosphère. Ici encore, les pays du Nord de l'Europe sont moteurs : **on trouve sous la mer du Nord des formations salines profondes qui sont particulièrement adaptées à la minéralisation du CO<sub>2</sub>**. Ces formations sont situées sous le plancher océanique, à plusieurs milliers de mètres de profondeur.

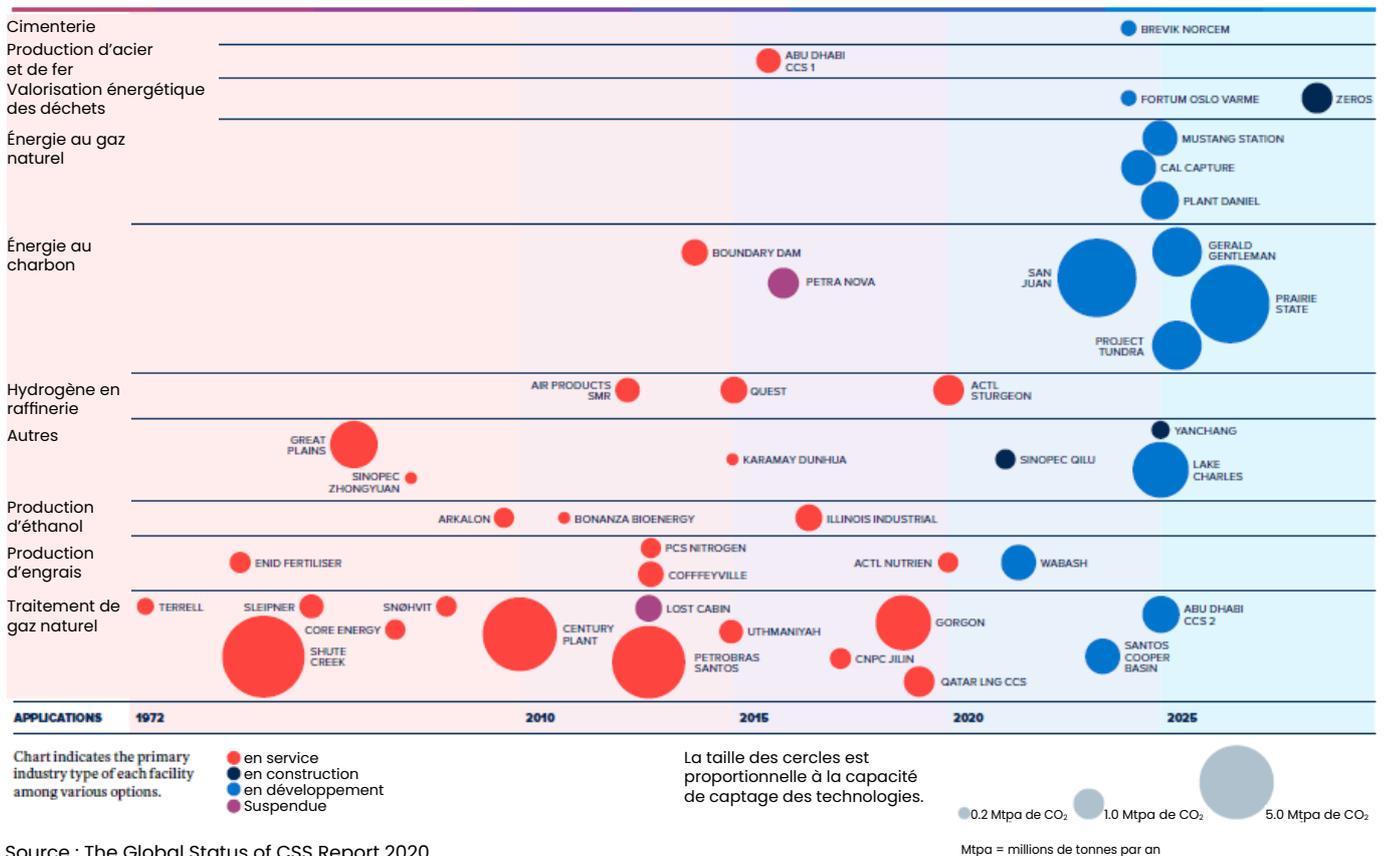
### La minéralisation du CO<sub>2</sub>



**Exemples de réactions du CO<sub>2</sub> avec des minéraux** contenus dans les roches basaltiques

- **Olivine** :  $Mg_2SiO_4 + 2CO_2 \rightarrow 2MgCO_3$  (magnésite) +  $SiO_2$
- **Wollastonite** :  $CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow CaCO_3$  (carbonate de calcium = principal constituant du calcaire) +  $SiO_2$
- **Brucite** :  $Mg(OH)_2 + CO_2 \rightarrow MgCO_3$  (magnésite) +  $H_2O$

## Panorama des installations commerciales (existantes et en projet) de capture et de séquestration de CO<sub>2</sub>



Source : The Global Status of CSS Report 2020

## Des sites de séquestration sont-ils déjà opérationnels ?

On dénombre aujourd'hui 21 sites opérationnels pour capter et séquestrer du CO<sub>2</sub> dans le Monde. **Parmi ces 21 sites, 5 sont des sites de séquestration dans des aquifères salins profonds<sup>1</sup> et servent au stockage permanent du CO<sub>2</sub>.** Les 16 autres sites, principalement situés aux États-Unis, servent à la récupération assistée de pétrole par injection de CO<sub>2</sub>. Cette technique consiste à injecter du CO<sub>2</sub> dans un réservoir de pétrole dont la production est en déclin.

Dans ce cas, le but principal est la récupération d'hydrocarbures, même si la majorité du CO<sub>2</sub> restera dans le réservoir à la place du pétrole extrait.

**Aujourd'hui, les 21 installations de CSC captent environ 35 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an.**

Il n'existe pas de frein technologique particulier à la séquestration de CO<sub>2</sub> : les technologies à utiliser sont celles de l'industrie d'extraction des hydrocarbures (notamment pour les forages).

<sup>1</sup> [La capture et séquestration de carbone pour réduire nos émissions de CO2 – CARBONE#4 – Le Réveilleur \(lereveilleur.com\)](https://www.lereveilleur.com/)

## Faire de la séquestration en France ?

En France, aucun site de séquestration de CO<sub>2</sub> n'est prêt à être mis en service. Toutefois, dans son chapitre dédié aux enjeux du stockage du carbone<sup>2</sup>, la SNBC explique que « La France dispose de 3 principaux bassins sédimentaires dans lesquels le stockage terrestre (onshore) serait possible dans les aquifères salins (Bassin parisien, Bassin aquitain, Bassin du Sud-Est et Provence) ou bien dans les champs de production d'hydrocarbures épuisés (Bassin parisien, Bassin aquitain). » Elle s'appuie sur les données du BRGM, qui estimait le potentiel de la France à environ 1 000 à 1 500 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, et nuance néanmoins : « le potentiel de stockage géologique de CO<sub>2</sub> en France est encore mal connu à terre et inconnu en mer (plateaux continentaux). Ce dernier présente pourtant une faisabilité et une acceptabilité sociale supérieure au stockage terrestre (localisation des puits d'injection, suivi de la permanence du stockage, etc.). ».

Concernant la séquestration en mer (offshore) : « Des sites de stockage pourraient notamment être localisés sur la côte Atlantique et en Méditerranée. Un stockage dans les anciens gisements de pétrole en mer du Nord serait également possible, sur lequel plusieurs projets impliquant notamment des industriels français sont actuellement à l'étude. ».

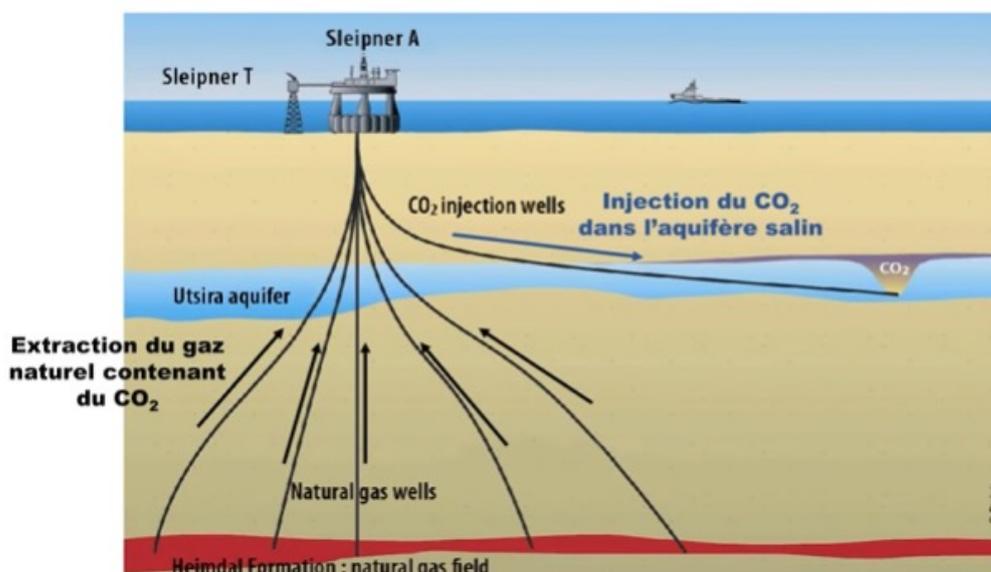
Dans le cadre du projet de récupération d'énergie géothermique ANR CO<sub>2</sub>-Dissolved, porté par le BRGM, l'opportunité de séquestrer du CO<sub>2</sub> a été étudiée. Plusieurs sites émetteurs français compatibles ont été identifiés et un pilote de démonstration est prévu pour démontrer la viabilité des scénarios simulés.



### Le projet Sleipner

## SLEIPNER : UN PROJET PIONNIER EN EUROPE

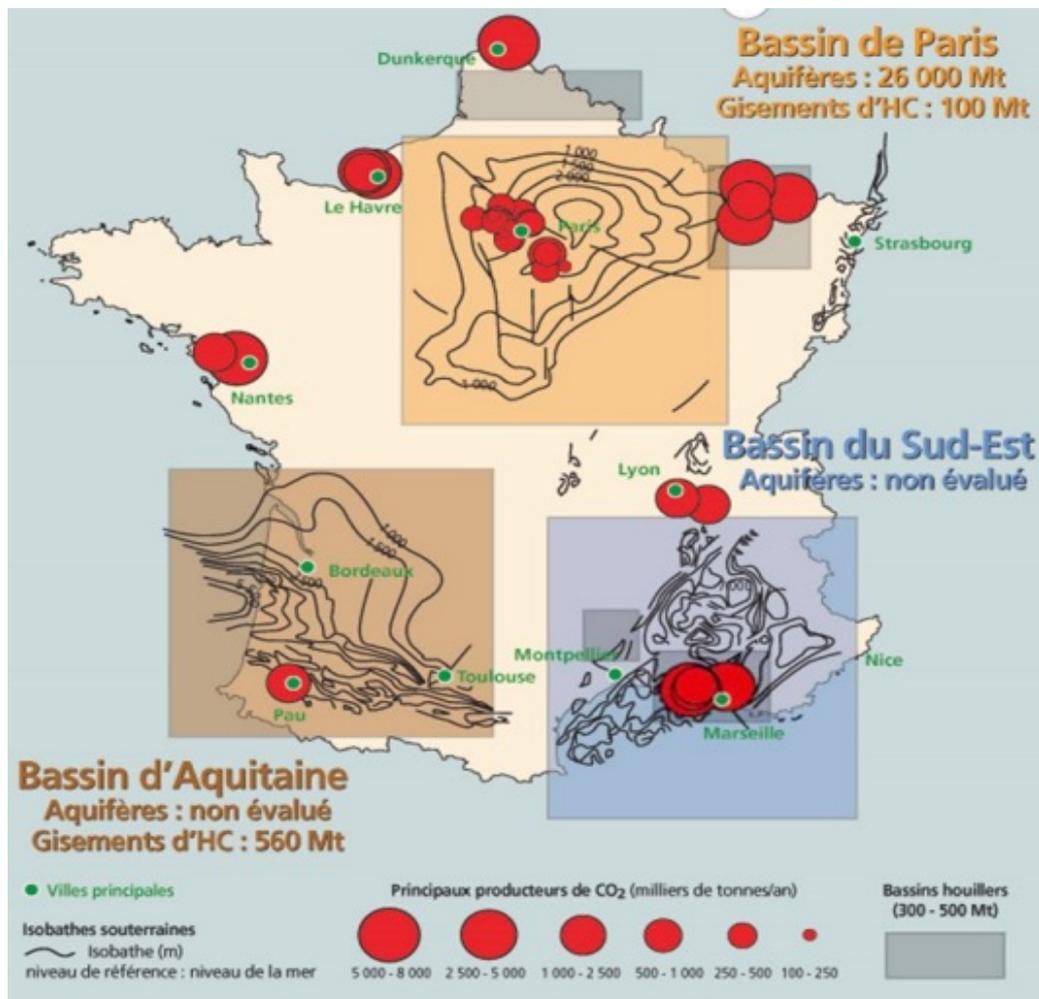
Initialement, la plateforme extrait du gaz ensuite expédié vers l'Europe (représentant 3 % des importations de gaz de l'UE). Depuis 1996, la société StatoilHydro réinjecte du CO<sub>2</sub> dans les puits. Au total aujourd'hui, plus de 20 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> ont été injectées.



Source : Geophysics and Geosequestration, Cambridge University Press, 2019.

2 SNBC - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone (europa.eu) - p. 164

## Les formations géologiques propices à la séquestration de CO<sub>2</sub> en France



Source : BRGM

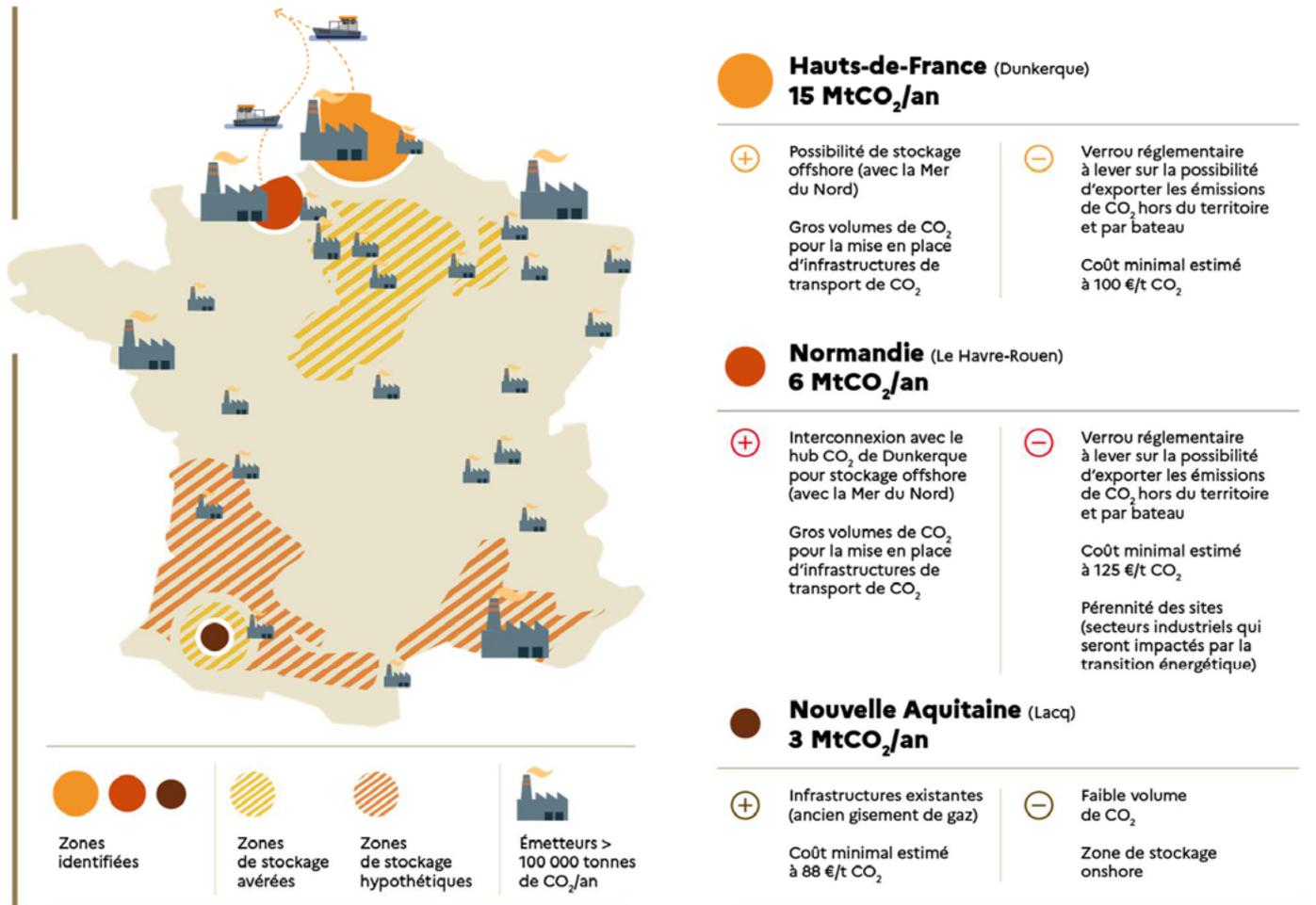
Par ailleurs un démonstrateur soutenu financièrement par Total a permis de capter plus de 100 000 tonnes de CO<sub>2</sub> entre 2010 et 2013. Une chaîne complète de captage-séquestration de CO<sub>2</sub> industriel a pu être testée : extraction, traitement et oxycombustion du gaz naturel, récupération et traitement du CO<sub>2</sub>, puis transport et enfin stockage à plus de 4 000 mètres de profondeur dans un réservoir de gaz épuisé.

La séquestration sur terre semble technologiquement faisable, mais les capacités semblent réduites, et les enjeux sociétaux sont forts.

Selon l'Ademe, « Au regard des émissions de gaz à effet de serre françaises de 465MtCO<sub>2</sub> équivalent en 2017, dont 350 Mt pour le seul CO<sub>2</sub>, seuls 107 MtCO<sub>2</sub> émis par des secteurs industriels et de production d'énergie, peuvent être concernés par la technologie CSC. Parmi elles, seules les émissions d'origine industrielle qui représentent un total de 65 MtCO<sub>2</sub>, sont véritablement accessibles au CSC. L'ADEME a réalisé une analyse croisée entre la localisation des sites industriels « éligibles » et les contraintes liées au CSC :

- volume d'émissions de CO<sub>2</sub> des sites industriels (seules les sources d'émissions importantes permettent de réduire les coûts) ;

Le potentiel pour la mise en oeuvre du captage et de la séquestration de CO<sub>2</sub> en France



Source : Ademe

- capacité de stockage géologique (en excluant le stockage géologique terrestre pour des raisons d'acceptabilité sociale) ;
- concentration des industriels émetteurs sur un territoire (mutualisation des infrastructures de transport de CO<sub>2</sub> pour réduire les coûts). »<sup>3</sup>.

**S'il n'existe pas de projets de séquestration, la France dispose tout de même, grâce à ses façades maritimes, d'un accès facile à des projets à l'étranger. Les bassins industriels de Normandie et des Hauts-de-France sont idéalement situés de ce point de vue.**

<sup>3</sup> [Ademe, Le captage et stockage géologique de CO<sub>2</sub> \(CSC\) en France : un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles, 2020 \(ademe.fr\)](https://www.ademe.fr/fr/le-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france-un-potentiel-limite-pour-reduire-les-emissions-industrielles-2020)

## Quels sont les risques de la séquestration ?

Selon le BRGM, « les formations géologiques peuvent **piéger de très grandes quantités de CO<sub>2</sub>** pendant des millions d'années. Les connaissances du comportement du CO<sub>2</sub> dans le sous-sol ont permis de montrer un piégeage efficace du carbone, sous forme dense (état supercritique), dans les pores des roches réservoirs au-delà de 800 m de profondeur. »<sup>4</sup>.

La séquestration de CO<sub>2</sub> perd tout son intérêt si ce dernier remonte à la surface. D'après le GIEC<sup>5</sup>, deux scénarios de fuite existent. Le premier est une fuite brutale et rapide, par la rupture des puits d'injection ou la remontée du CO<sub>2</sub> par des puits abandonnés. Le second est la remontée diffuse et progressive du CO<sub>2</sub> par des failles ou des fissures non-décélées, ou par des puits qui ne sont pas complètement étanches. Pour des stockages sur terre, les conséquences environnementales de telles fuites pourraient être importantes. L'enjeu est moindre pour des stockages en mer.

**Le choix de réservoirs ou de formations salines profondes adaptés est donc primordial pour garantir l'absence de fuites.** Dans le cas des aquifères salins profonds, le CO<sub>2</sub> se dissout dans l'eau et/ou se transforme en calcaire à 2 000 mètres de profondeur et a un comportement stable. D'après le GIEC, « Si l'on injecte du CO<sub>2</sub> dans des formations salines ou dans des champs de pétrole ou de gaz naturel appropriés, à une profondeur supérieure à 800 m, divers mécanismes physiques et géochimiques de piégeage l'empêcheront de migrer vers la surface. En général, la présence d'une roche couverture constitue un mécanisme essentiel de piégeage physique »<sup>6</sup>.

La surveillance est aussi indispensable.

Par ailleurs, d'après une étude du **National Energy Technology Laboratory (NETL)**, les facteurs suivants sont de nature à garantir la sécurité des stockages :

- un retour d'expérience de près de 50 ans de l'industrie ;
- les progrès technologiques réalisés ces 20 dernières années au travers de programmes de recherche ;
- des campagnes d'essais sur le terrain pour identifier les bonnes pratiques et les outils de surveillance ;
- une compréhension accrue des mécanismes physiques, chimiques et mécaniques à l'œuvre ;
- la multiplication du nombre de démonstrateurs et de projets.

Enfin l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) a fait un état des lieux de la filière du captage-séquestration de CO<sub>2</sub>, et a proposé une base de données de retours d'expériences, ciblant notamment les incidents et accidents recensés (80 événements recensés à travers le monde au moment de la publication).

Selon le retour d'expériences, l'origine des incidents et accidents serait liée à :

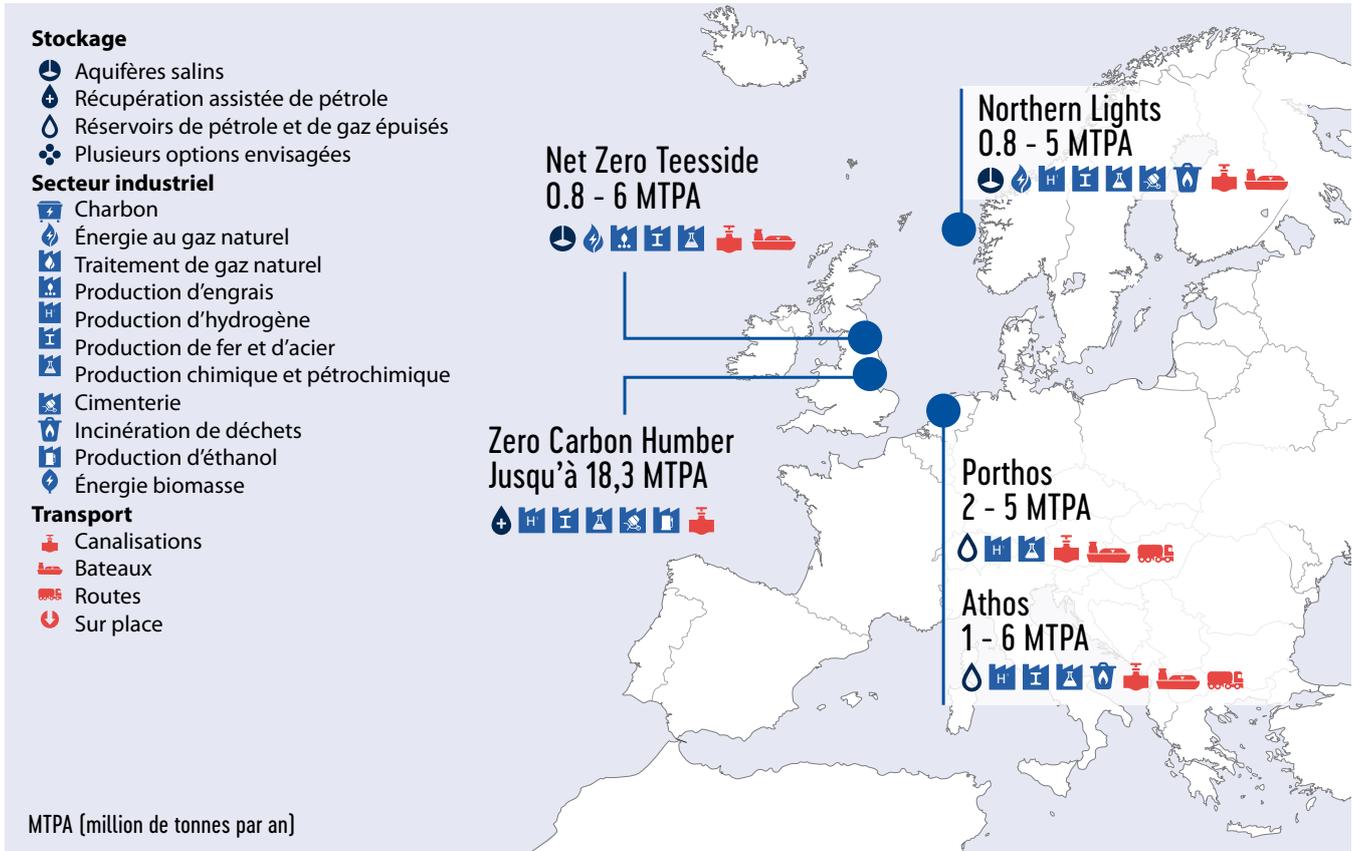
- l'erreur de conception ou la sous-estimation de certains mécanismes lors de la conception (42 %) ;
- la défaillance technique en exploitation (21 %) ;
- les interventions humaines (24 %) ;
- les événements sismiques et les glissements de terrain (9 %).

4 Caractérisation d'un site potentiel de stockage de CO<sub>2</sub> - BRGM ([www.brgm.fr](http://www.brgm.fr))

5 Captage et stockage du dioxyde de carbone, GIEC ([ipcc.ch](http://ipcc.ch))

6 Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Rapport spécial du GIEC : Piégeage et stockage du dioxyde de carbone, 2005 ([www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/))

Les projets de séquestration en développement en Europe



Source : The Global Status of CSS Report 2020

## Où serait séquestré le CO<sub>2</sub> capté à Lumbres et Réty ?

Le site de séquestration du CO<sub>2</sub> capté à Lumbres et Réty, puis transporté et conditionné par D'Artagnan, n'est pas encore choisi. **L'option privilégiée à ce stade est la séquestration dans des formations salines profondes plutôt que dans d'anciens réservoirs d'hydrocarbures.**



### LE PROJET NORTHERN LIGHTS

Le projet Northern Lights, au large des côtes norvégiennes, est l'un des projets de séquestration de CO<sub>2</sub> les plus avancés en Europe. Ce projet intègre le transport, la réception et la séquestration du CO<sub>2</sub> dans un aquifère salin, à environ 2 500 mètres sous les fonds marins du plateau continental norvégien.

Le forage d'injection a été autorisé par les autorités norvégiennes en 2019.

Dès 2024, 1,5 million de tonnes par an pourront être prises en charge. Il prévoit, à terme, une capacité de séquestration de 5 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an.

Au moins 4 projets sont en développement en mer du Nord, avec une capacité maximale de séquestration de 22 millions de tonnes par an :

- Northern Lights, au large des côtes norvégiennes, dans une formation saline profonde ;
- Net Zero Teesside, au large des côtes britanniques, dans une formation saline profonde ;
- Porthos et Athos, dans d'anciens réservoirs d'hydrocarbures.

Un cinquième projet – Zero Carbon Humber – permettrait la récupération assistée de pétrole par injection de CO<sub>2</sub>, et permettrait de séquestrer 18,3 millions de tonnes.

**Le choix du transport maritime pour le transfert du CO<sub>2</sub> du Terminal CO<sub>2</sub> permettra aux industries de choisir le site de séquestration selon les conditions économiques proposées par leurs gestionnaires** (voir chapitre §8.8).

## Encadrement communautaire de la séquestration du dioxyde de carbone

La directive CSC 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 encadre spécifiquement la séquestration du dioxyde de carbone. Elle s'applique à la séquestration du dioxyde de carbone de plus de 100 kilotonnes sur le territoire des États membres, dans leurs zones économiques exclusives et sur leurs plateaux continentaux ([Dir. 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil 23 avr. 2009, art. 2 : JOUE n° L 140, 5 juin](#)).

Le cadre réglementaire communautaire repose sur une évaluation intégrée des risques de fuite de dioxyde de carbone :

- il fixe des exigences de sélection des sites pour réduire au minimum les risques de fuite ;
- il prévoit des systèmes de surveillance et de communication d'informations pour vérifier le stockage et des mesures de réparation des dégâts potentiels.

Les États membres doivent présenter tous les quatre ans à la Commission un rapport sur la mise en œuvre de la directive ([Dir. 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil 23 avr. 2009, art. 27](#)). Le premier rapport doit être transmis au plus tard le 30 juin 2011 sur la base du questionnaire ou canevas élaboré par la Commission sous forme d'acte d'exécution ([Déc. n° 2011/92/UE de la Commission 10 févr. 2011 : JOUE n° L 37, 11 févr.](#)).

Les rapports des États membres, transmis à la Commission entre juillet 2011 et avril 2013, ont été pris en considération dans le premier rapport de février 2014 de la Commission sur la directive CSC. Le rapport montre que tous les États membres ont notifié leurs mesures de transposition à la Commission, laquelle entame donc des procédures d'infraction pour défaut partiel de communication des mesures de transposition et vérifie si les mesures notifiées sont conformes, sur le fond, à la directive. La directive CSC prévoit la remise d'un rapport de la Commission au plus tard le 31 mars 2015, évaluant certains aspects de la directive et présentant, s'il y a lieu, une proposition de révision de la directive ([Dir. 2009/31/CE du Parlement européen et du Conseil 23 avr. 2009, art. 38](#)).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DÉDIÉES À LA SÉQUESTRATION DU CO<sub>2</sub>

- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Rapport spécial du GIEC : Piégeage et stockage du dioxyde de carbone, 2005  
Disponible sur : [www.ipcc.ch/](http://www.ipcc.ch/).  
Ce rapport évalue les options technologiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et examine la faisabilité de la séquestration de CO<sub>2</sub> à grande échelle.
- Ademe, Le captage et stockage géologique de CO<sub>2</sub> (CSC) en France : un potentiel limité pour réduire les émissions industrielles, 2020  
Disponible sur [librairie.ademe.fr/](http://librairie.ademe.fr/).  
Cet avis publié par l'Ademe évalue le potentiel du captage et de la séquestration de dioxyde de carbone comme une option de décarbonation en examinant les atouts et les limites de cette technologie, dont les coûts, le cadre réglementaire et les conditions nécessaires pour mettre en place des projets de séquestration en France.
- Cornot-Gandolphe S., Un nouvel élan pour le captage, stockage et utilisation du carbone (CCUS) en Europe, Études de l'Ifri, septembre 2021  
Disponible sur : [www.ifri.org/fr/publications/etudes-de-lifri/un-nouvel-elan-captage-stockage-utilisation-carbone-ccus-europe](http://www.ifri.org/fr/publications/etudes-de-lifri/un-nouvel-elan-captage-stockage-utilisation-carbone-ccus-europe).  
Cette étude dresse l'état des lieux des projets de captage et de séquestration du CO<sub>2</sub> en Europe et détaille les facteurs clés et les éléments essentiels de l'évolution de cette technologie.
- Page, B., Turan G., Zapantis A., et al., The Global Status of CCS Report 2020 (en anglais), décembre 2020  
Disponible sur : [www.globalccsinstitute.com](http://www.globalccsinstitute.com).  
Ce rapport établit le rôle des technologies de captage et de séquestration de dioxyde de carbone dans la réduction des émissions de carbone à l'horizon 2050. Il fournit des informations détaillées et des analyses sur la filière, les perspectives politiques internationales et l'environnement juridique et réglementaire. Il documente par ailleurs l'état actuel et les progrès des technologies de captage et de séquestration dans le Monde.
- AIE, Transforming Industry through CCUS (en anglais), 2019  
Disponible sur : [www.iea.org](http://www.iea.org).  
Ce rapport traite de la transformation de l'industrie grâce au captage et séquestration ou utilisation du CO<sub>2</sub> pour réduire les émissions de gaz à effet de serre issues du secteur. Le document explore les atouts, les défis et les opportunités associés à l'utilisation de cette technologie.
- De Lorgeril C., Lesestre Y., CCU et neutralité carbone : des filières à structurer et des freins à lever, mars 2021  
Disponible sur : [www.sia-partners.com](http://www.sia-partners.com).  
Le rapport examine les différentes options du captage-séquestration du CO<sub>2</sub>, notamment l'utilisation du CO<sub>2</sub> à des fins industrielles.
- Lavergne R., Legait B., Clause E. et al., La décarbonation des entreprises en France, 2020  
Disponible sur : [La décarbonisation des entreprises françaises \(economie.gouv.fr\)](http://La%20d%C3%A9carbonisation%20des%20entreprises%20fran%C3%A7aises%20(economie.gouv.fr))  
Ce rapport recense des recommandations à destination des pouvoirs publics afin d'accélérer la décarbonation de l'industrie française. Il mentionne notamment la mise en place de dispositifs d'aides en faveur des projets industriels et de leurs financements, la préparation à la mise en place d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières, la mise à jour d'une feuille de route de logistique et de stockage du CO<sub>2</sub>, le développement au recours à des produits décarbonés, etc.

- Rodolphe Meyer, La capture et séquestration de carbone pour réduire nos émissions de CO<sub>2</sub> – Carbone#4, septembre 2020

Disponible sur : [www.lereveilleur.com/csc-reduction-des-emissions/](http://www.lereveilleur.com/csc-reduction-des-emissions/).

Cette vidéo discute des défis à la mise en place des stratégies de réduction des émissions de gaz à effet de serre en se concentrant sur le captage et la séquestration du dioxyde de carbone.

- Ineris, retour d'expérience des incidents et accidents sur des sites d'exploitation ou de stockage en milieu souterrain – application au stockage géologique du CO<sub>2</sub>, 30 mai 2013

Disponible sur : [Stockage CO<sub>2</sub> \(ineris.fr\)](http://Stockage%20CO2%20(ineris.fr))

L'Ineris propose un retour d'expériences afin de construire une base de données d'incidents ou d'accidents, à partir d'une recherche documentaire ciblée sur le captage-séquestration du CO<sub>2</sub> et le stockage de gaz naturel ; cette recherche s'est appuyée sur l'analyse de bases de données publiques contenant des événements sur les stockages souterrains et les exploitations d'hydrocarbures, ainsi que l'analyse d'analogues naturels impliquant du CO<sub>2</sub>.



**cap-decarbonation.fr**