

## Questions fréquentes

### **QUESTIONS GENERALES..... 2**

1. Qu'est-ce que le CO<sub>2</sub>? .....2
2. En quoi consiste le stockage géologique du CO<sub>2</sub>? .....2
3. Le stockage du CO<sub>2</sub> est-il sûr ? .....2
4. Comment s'assurer que le CO<sub>2</sub> restera stocké ? .....3
5. Comment savoir si le CO<sub>2</sub> fuit ? .....3
6. Est-ce que la qualité de l'eau potable sera affectée si le CO<sub>2</sub> fuit ? .....3
7. Qu'advient-il en cas de séisme ? .....4
8. Le stockage souterrain de CO<sub>2</sub> peut-il provoquer des événements sismiques ? .....4
9. Le stockage de CO<sub>2</sub> est-il similaire à la fracturation hydraulique ? .....4
10. En ce qui concerne la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, quel est le potentiel de la technologie CCS par rapport à d'autres alternatives ? .....5

### **QUESTIONS TECHNIQUES ..... 5**

1. Que se passera-t-il au point d'injection ? .....5
2. Quelle est la pression nécessaire pour injecter du CO<sub>2</sub> ? .....6
3. Qu'est-ce que la minéralisation du CO<sub>2</sub> et quelle est l'échelle de temps concernée?6
4. Faut-il forer de nouveaux puits ou serait-il possible de réutiliser des puits existants?7
5. Quel est le coût du stockage de CO<sub>2</sub> ? .....7

### **QUESTIONS SPÉCIFIQUES AU CAS D'ETUDE "BASSIN DE PARIS" .....7**

1. Le stockage de CO<sub>2</sub> peut-il avoir un impact sur d'autres ressources souterraines ? ....7
2. Quelle est l'expérience des opérations de stockage de CO<sub>2</sub> en cours en France et à l'étranger ? .....7
3. Quels sont les risques pour le territoire et pour les populations voisines, notamment les agriculteurs ? .....8
4. Quel est l'impact sur le paysage et sur l'utilisation des terres ? .....8
5. Quelles sont les conséquences socio-économiques pour le territoire ? .....8

## Questions fréquentes

### QUESTIONS GENERALES

#### 1. Qu'est-ce que le CO<sub>2</sub>?

Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est un élément fondamental et essentiel de la nature. C'est une substance naturellement présente dans l'organisme humain et dans l'atmosphère. Nous l'expirons lors de la respiration. Les plantes en ont besoin pour leur croissance à travers le processus de photosynthèse. En termes de santé humaine et animale, le CO<sub>2</sub> ne peut être toxique qu'à très forte concentration, lorsqu'il remplace l'oxygène de l'air inspiré. Le principal impact du CO<sub>2</sub> est environnemental, car, en tant que gaz à effet de serre, il contribue à l'augmentation des températures de l'atmosphère à l'échelle mondiale, exacerbant les effets du changement climatique avec des conséquences sur la santé humaine et la biodiversité.

#### 2. En quoi consiste le stockage géologique du CO<sub>2</sub>?

Le stockage géologique du CO<sub>2</sub> consiste en l'injection de CO<sub>2</sub> dans un réservoir géologique profond par l'intermédiaire d'un puits. Le réservoir est constitué d'une roche poreuse, c'est-à-dire qu'au niveau microscopique il y a beaucoup d'espace entre les grains de la roche. Il s'agit typiquement de grès ou de calcaire. L'espace poreux est initialement rempli de fluides, en général de l'eau saline (dans ce cas, la couche géologique est appelée "aquifère salin"). C'est dans cet espace poreux que le CO<sub>2</sub> est stocké, le réservoir agissant à la manière d'une éponge. Le réservoir est surmonté d'une couche géologique imperméable appelée roche couverture (par exemple des roches argileuses), empêchant la remontée du CO<sub>2</sub>. Le réservoir se situe à très grande profondeur, plus de 800m, afin que le CO<sub>2</sub> soit dans un état dense, ce qui permet de maximiser la quantité de CO<sub>2</sub> qui pourrait être stockée dans ce réservoir.

#### 3. Le stockage du CO<sub>2</sub> est-il sûr ?

Les connaissances et la compréhension que nous avons des réservoirs naturels de CO<sub>2</sub>, l'expérience des pilotes ou des démonstrateurs de stockage de CO<sub>2</sub> déjà réalisés à l'international et une importante base de travaux de recherche internationaux, permettent de garantir la sûreté du concept de stockage géologique de CO<sub>2</sub>. Des centaines de millions de tonnes de CO<sub>2</sub> anthropique ont été transportées, injectées et stockées dans des formations géologiques depuis plus de quatre décennies, sans incident répertorié compromettant leur sécurité. La probabilité que des fuites se produisent hors de la zone de stockage est faible et, même si c'était le cas, ces éventuelles fuites resteraient localisées et temporaires et il serait très peu probable qu'elles puissent engendrer des dommages importants aux écosystèmes ou aux populations.

#### 4. Comment s'assurer que le CO<sub>2</sub> restera stocké ?

Les conséquences à moyen et long terme d'un stockage souterrain du CO<sub>2</sub> sont bien comprises, car il a été démontré que des réservoirs naturels ont pu contenir du CO<sub>2</sub> en toute sécurité pendant des dizaines de millions d'années. Les sites de stockage de CO<sub>2</sub> les plus appropriés se situent à plus de 800 mètres de profondeur et se trouvent dans les mêmes types de formations géologiques que les réservoirs d'hydrocarbures. Les mêmes mécanismes géologiques qui ont permis de contenir le pétrole et le gaz pendant des millions d'années garantiront également que le CO<sub>2</sub> soit bien piégé et non susceptibles de remonter à la surface. Par ailleurs, il sera mis en place des méthodes de surveillance permettant de vérifier le confinement du CO<sub>2</sub> à moyen et long terme.

#### 5. Comment savoir si le CO<sub>2</sub> fuit ?

Les sites de stockage de CO<sub>2</sub> sont soigneusement sélectionnés en fonction de critères spécifiques conçus pour garantir le confinement du CO<sub>2</sub> dans le réservoir. De plus, la réglementation du stockage de CO<sub>2</sub> exige que tout projet mette en place un plan de gestion des risques, ce qui signifie que des mesures de surveillance et de protection seront mises en place pour assurer la sûreté et la sécurité du stockage. Dans le cas peu probable de fuites du CO<sub>2</sub> vers la surface, des moyens de surveillance permettront à l'exploitant de les détecter, puis de déclencher les mesures pour contrôler, réduire et prévenir ces éventuelles fuites. Les technologies utilisées dans l'industrie pétrolière et gazière depuis des décennies sont largement transférables au transport et au stockage du CO<sub>2</sub>. Une gamme de techniques spécifiques au stockage du CO<sub>2</sub> a, de plus, été développée et utilisée avec succès depuis plus de 20 ans. Les stratégies de mesure, surveillance et vérification seront adaptées aux caractéristiques de chaque site de stockage.

#### 6. Est-ce que la qualité de l'eau potable sera affectée si le CO<sub>2</sub> fuit ?

Dans le sous-sol, l'eau potable se situe à faible profondeur. Au-delà, les eaux souterraines sont en général salées (plus chargées en minéraux dissous) et impropres à la consommation humaine. C'est à ces profondeurs-là que le stockage du CO<sub>2</sub> est envisagé. Du fait de la présence de la roche couverture, le risque de remontée de CO<sub>2</sub> depuis le stockage vers un aquifère d'eau potable est très faible et l'impact serait limité (par exemple, le CO<sub>2</sub> est le gaz présent dans les eaux gazeuses couramment consommées).

## 7. Qu'advient-il en cas de séisme ?

Les sites de stockage de CO<sub>2</sub> seront choisis loin des zones à fort aléa sismique ou à fort enjeu. Par exemple, le grand bassin de Paris est une région tectoniquement stable et le risque sismique y est très faible.

Le retour d'expérience de deux projets pilotes au Japon (le projet pilote de Nagaoka en 2004 et le projet de démonstration Tomakomai CCS en 2018) - l'une des régions les plus sismiques au monde - ont confirmé qu'aucune fuite n'a été détectée à la suite de grands séismes, et l'injection de CO<sub>2</sub> avait pu se poursuivre en toute sécurité une fois les enquêtes terminées. En effet, les séismes se ressentent surtout en surface et des cas réels ont montré que les ondes sismiques ont peu d'effet sur les infrastructures dans le sous-sol (comme des puits d'injection ou de surveillance).

## 8. Le stockage souterrain de CO<sub>2</sub> peut-il provoquer des événements sismiques ?

De manière générale, l'injection d'un fluide dans la roche poreuse peut provoquer une augmentation de la pression dans le réservoir, ce qui pourrait générer une micro-sismicité en cas de mouvements autour de fissures (cette sismicité est mesurable avec des instruments mais elle ne peut pas être ressentie en surface). Le site de stockage de CO<sub>2</sub> est soigneusement sélectionné afin de réduire tout risque de sismicité induite : zone de faible sismicité naturelle, éloignement de failles actives, bonne perméabilité du réservoir limitant l'augmentation de pression lors de l'injection, etc. De plus, la mise en place obligatoire de plans de gestion des risques et de surveillance, les technologies de surveillance sismique existantes et les mesures visant à contrôler le débit d'injection et la pression du réservoir, contribueront à réduire un éventuel risque de sismicité induite au cours des opérations de stockage.

## 9. Le stockage de CO<sub>2</sub> est-il similaire à la fracturation hydraulique ?

Non, ces deux activités sont très différentes. La fracturation hydraulique implique le forage d'un puits dans une roche mère riche en matière organique (schiste) mais très peu perméable, et l'injection de grandes quantités d'eau, de sable et de produits chimiques à haute pression. Le processus vise à créer un grand nombre de fissures ou fractures dans le schiste, qui contient du gaz et du pétrole, pour permettre à ces hydrocarbures de s'échapper de la roche et de remonter par un puits jusqu'à la surface. De nombreux puits sont généralement nécessaires pour mener à bien un projet de fracturation souterraine.

A l'inverse, le stockage géologique de CO<sub>2</sub> vise des roches poreuses et perméables pour permettre l'injection de grandes quantités de CO<sub>2</sub> sans recourir à la fracturation. Ces opérations ne nécessitent qu'un nombre restreint de puits. Les bonnes propriétés du réservoir assurent que le CO<sub>2</sub> injecté peut repousser l'eau salée présente initialement dans les pores (espaces vides de quelques millimètres) sans endommager la roche. De

plus, le site de stockage est recouvert d'une couche de roche imperméable (roche couverture), qui, associée à d'autres processus géochimiques, empêche toute remontée du CO<sub>2</sub> vers la surface. Le débit d'injection du CO<sub>2</sub> et la pression du réservoir sont contrôlés afin de ne pas risquer de fracturer la roche couverture.

## **10. En ce qui concerne la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, quel est le potentiel de la technologie CCS par rapport à d'autres alternatives ?**

Le captage et stockage du CO<sub>2</sub> (CCS) est une technologie complémentaire aux autres stratégies de réduction des émissions dans l'atmosphère. Elle peut être particulièrement efficace pour lutter contre les émissions irréductibles de secteurs industriels comme la production de ciment ou d'acier, d'engrais et de produits chimiques.

De plus, les technologies à émissions négatives seront cruciales pour atteindre les objectifs climatiques au-delà de 2050. Le CCS est un pilier pour obtenir des émissions négatives grâce aux technologies d'élimination des gaz à effet de serre, telles que le Captage Direct dans l'Air (DAC) ou l'élimination du dioxyde de carbone biogénique, comme avec la BioÉnergie avec Captage et Stockage du CO<sub>2</sub> (BECCS), ou avec la valorisation énergétique des déchets couplée au CCS.

Le CCS représente également l'une des principales voies actuelles pour la production d'hydrogène à faible teneur en carbone, qui peut être utilisé pour décarboner l'industrie et les transports.

Dans l'ensemble, le CCS offre un moyen rapide de stocker de grands volumes de CO<sub>2</sub> (des dizaines de millions de tonnes par site de stockage) avec une empreinte au sol réduite.

Pour une réduction réussie et durable des émissions de CO<sub>2</sub>, il est essentiel de combiner le CCS avec une consommation plus responsable, une transition plus large vers des sources d'énergie décarbonées (renouvelable ou nucléaire), des améliorations de l'efficacité énergétique et d'autres pratiques durables (voir les recommandations du GIEC).

## **QUESTIONS TECHNIQUES**

### **1. Que se passera-t-il au point d'injection ?**

Une fois le point d'injection établi (localisation du puits, profondeur d'injection), le CO<sub>2</sub> est placé sous pression et introduit dans le puits. La pression appliquée est soigneusement contrôlée pour garantir que le CO<sub>2</sub> reste dans un état dense (liquide ou supercritique), ce qui améliore ses propriétés et sa capacité à circuler à travers les pores de la roche.

Au fur et à mesure que le CO<sub>2</sub> est injecté dans le réservoir, il interagit avec les formations rocheuses environnantes. Selon les caractéristiques du réservoir, le CO<sub>2</sub> se dissoudra

plus ou moins dans les eaux salines du réservoir, réagira avec les minéraux de la roche et déplacera les fluides dans les pores à mesure qu'il migre lentement à travers la roche.

## 2. Quelle est la pression nécessaire pour injecter du CO<sub>2</sub> ?

La pression requise pour injecter le CO<sub>2</sub> en vue de son stockage dépend de divers facteurs, notamment les caractéristiques du site de stockage et les exigences spécifiques du projet. En général, la pression d'injection doit être suffisante pour garantir que le CO<sub>2</sub> reste dans un état dense dans le réservoir, afin de maximiser la capacité de stockage.

Le CO<sub>2</sub> est injecté dans un réservoir géologique profond constitué d'une roche poreuse, comme du calcaire ou du grès. Or, dans le sous-sol, la pression augmente avec la profondeur, du fait du poids des roches et des fluides. La pression initiale dans le réservoir est donc très élevée par rapport à la surface. La pression d'injection doit donc être supérieure à la pression du réservoir pour que le CO<sub>2</sub> puisse pénétrer dans la roche. Elle dépend également de la porosité et de la perméabilité de la roche réservoir, de la densité du CO<sub>2</sub>, des caractéristiques de la roche couverture (la couche imperméable située au-dessus de la formation de stockage, empêchant la remontée de CO<sub>2</sub>). La pression doit en effet être maîtrisée afin de ne pas endommager la roche couverture et garantir que le CO<sub>2</sub> reste contenu dans le réservoir. En général, les pressions d'injection varient de quelques dizaines de bars par rapport à la pression naturelle du réservoir.

Les activités de caractérisation du site et de surveillance jouent un rôle important dans l'évaluation de la capacité de stockage et la détermination de la pression d'injection appropriée pour garantir un stockage sûr du CO<sub>2</sub>.

## 3. Qu'est-ce que la minéralisation du CO<sub>2</sub> et quelle est l'échelle de temps concernée?

Le stockage permanent du CO<sub>2</sub> dans le réservoir est assuré par différents mécanismes impliquant dans un premier temps le piégeage par la roche couverture imperméable, par les pores de la roche réservoir et par la dissolution. A plus long terme, la minéralisation peut également contribuer au piégeage permanent du CO<sub>2</sub>. En effet, la réaction chimique qui se produit lorsque le CO<sub>2</sub> injecté réagit avec les minéraux de la roche réservoir produit des minéraux solides stables tels que des minéraux carbonatés. La vitesse de réaction et la composition minérale résultante dépendent de facteurs tels que la pression, la température et la géochimie du réservoir. Les réservoirs choisis pour le stockage de CO<sub>2</sub> possèdent généralement des conditions favorables à la minéralisation. Bien que la réaction de carbonatation minérale commence immédiatement après l'injection, on estime qu'il faut dans le cas général des milliers d'années pour qu'une partie significative du CO<sub>2</sub> soit piégée par minéralisation. Par conséquent, elle joue généralement un rôle mineur dans les premières étapes d'un projet

de stockage, la majorité du CO<sub>2</sub> étant stockée de manière permanente par les autres mécanismes.

Cependant, dans certaines formations rocheuses comme les basaltes, qui contiennent des minerais de fer et de magnésium réactifs, une partie significative du CO<sub>2</sub> peut subir une minéralisation rapide (en 2 ans par exemple). Ce processus naturel est utilisé par le projet Carbfix, où le dioxyde de carbone est dissous dans l'eau et injecté dans des formations basaltiques, avec lesquelles il interagit rapidement menant à une minéralisation.

#### **4. Faut-il forer de nouveaux puits ou serait-il possible de réutiliser des puits existants?**

Pour le stockage dans les aquifères salins profonds, un petit nombre de puits est généralement requis. Cela inclut le puits de caractérisation, le puits d'injection et le(s) puits de surveillance, le cas échéant. Pour le stockage dans un champ de gaz déplété, les puits existants peuvent être réutilisés s'ils sont en bon état et situés au bon endroit ; sinon, un nouveau puits d'injection sera foré pour placer le CO<sub>2</sub> dans une zone spécifique du champ.

#### **5. Quel est le coût du stockage de CO<sub>2</sub> ?**

Une analyse effectuée par la ZEP (Zero Emission Platform) pour l'Union européenne a suggéré une large gamme de coûts, de 1 à 20 euros par tonne, la plupart des fourchettes se situant entre 2 et 10 euros par tonne pour les aquifères salins profonds et les gisements d'hydrocarbures épuisés. Une analyse récente réalisée par Smith (2021) pour le MIT a également conclu que les coûts variaient de 3 à 10 dollars par tonne, avec une moyenne d'environ 5 dollars par tonne.

### **QUESTIONS SPÉCIFIQUES AU CAS D'ETUDE "BASSIN DE PARIS"**

#### **1. Le stockage de CO<sub>2</sub> peut-il avoir un impact sur d'autres ressources souterraines ?**

L'impact souterrain du stockage de CO<sub>2</sub> est limité à la ligne de délimitation du site de stockage, qui est de taille similaire à celle d'un champ pétrolier et gazier typique. Le choix du site de stockage et la planification de son périmètre sont établis de manière à éviter les interactions avec d'autres usages du sous-sol (ressources en eaux souterraines, géothermie, etc.) tout au long de la durée du stockage.

#### **2. Quelle est l'expérience des opérations de stockage de CO<sub>2</sub> en cours en France et à l'étranger ?**

En France, il n'y a actuellement pas d'opérations de stockage de CO<sub>2</sub> en cours. De 2010 à 2013, un pilote de stockage a injecté 50 000 tonnes de CO<sub>2</sub> dans le réservoir de gaz épuisé de Rouse, dans le Sud-Ouest de la France. La filière CCS dispose toutefois d'une grande

expérience à l'étranger en matière de transport et de stockage du CO<sub>2</sub>. Un exemple notable est le site de stockage de CO<sub>2</sub> de Sleipner en Norvège, qui a débuté en 1996. Ce projet a été l'un des pionniers dans le captage et le stockage permanent de grandes quantités de CO<sub>2</sub>. Il a stocké avec succès plus de 20 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> et continue de séquestrer plus d'un million de tonnes de CO<sub>2</sub> chaque année. Le CO<sub>2</sub> est stocké en toute sécurité dans une formation saline profonde sous la mer du Nord norvégienne, dans un réservoir assurant son confinement à long terme. En 2023, il existe 30 installations de CCS en exploitation commerciale. Elles sont situées aux États-Unis, en Chine, en Australie, au Moyen-Orient, au Canada et en Europe.

### **3. Quels sont les risques pour le territoire et pour les populations voisines, notamment les agriculteurs ?**

La probabilité d'une fuite est faible et l'impact d'une fuite serait très faible et localisé. Concrètement, lors des réunions tenues en 2022 à la Chambre d'agriculture 77, les points suivants ont été abordés :

- Concernant la pédologie (science des sols), aucun risque n'est identifié pour les cultures ou les milieux naturels.
- Concernant les chasseurs, aucun risque n'est identifié pour le gibier ou les écosystèmes.
- Des agriculteurs ont exprimé des inquiétudes quant à de possibles expropriations pour l'installation d'un site de stockage de CO<sub>2</sub> (comme dans le cas ancien de l'exploitation du pétrole sur la zone). Il a été rappelé que l'emprise au sol d'un site de stockage de CO<sub>2</sub>, sera très réduite, et ne justifierait pas a priori une expropriation.

### **4. Quel est l'impact sur le paysage et sur l'utilisation des terres ?**

L'impact sur le paysage d'un stockage de CO<sub>2</sub> est minime. La tête de puits a généralement une empreinte au sol de quelques mètres carrés (environ 2 m x 2 m), et une hauteur inférieure à 4 m. Le site de stockage disposera d'un périmètre autour du puits d'environ la taille d'un hangar. Le site nécessitera l'acheminement du CO<sub>2</sub> capté. Sur le terrain, il s'agira généralement d'une canalisation de petit diamètre similaire à celle qui transporte le gaz naturel. Des stations de surveillance seront nécessaires, mais n'interféreront généralement pas avec l'utilisation des terrains.

### **5. Quelles sont les conséquences socio-économiques pour le territoire ?**

Un territoire ou une communauté pourrait bénéficier économiquement de l'accueil d'un site de stockage, via, notamment, la création d'emplois, le développement d'infrastructures et la génération de croissance économique. Le CCS contribue à la





Accélérer le stockage du CO<sub>2</sub>  
pour un futur durable

## Stockage géologique du CO<sub>2</sub> dans des régions stratégiques

Construire un avenir bas carbone et résilient face  
au changement climatique

Coordinatrice: Dr Fernanda M.L. Veloso, BRGM (f.veloso@brgm.fr)

durabilité des activités industrielles, ce qui peut permettre le maintien de cet élément de l'activité économique dans la communauté locale. En s'engageant concrètement dans la lutte contre la crise climatique grâce au CCS, la communauté locale pourrait ressentir de la fierté et bénéficier d'une forme de reconnaissance sociale.