

# Le Carbone Capture and Storage (CCS) : un véritable atout, des arbitrages nécessaires

Par Maxime EFOUI-HESS

The Shift Project

Exposée à une inévitable double contrainte carbone – décarboner l'intégralité de ses activités à hauteur de 80 % d'ici à 2050 et s'affranchir presque intégralement des intrants fossiles –, la France ne pourra faire l'économie d'une transformation. Le plan de transformation de l'économie française de The Shift Project permet de projeter la France sur des trajectoires à la fois cohérentes sur le plan physique (énergie, matières) et sur celui de l'emploi, ainsi qu'au regard des enjeux.

Parmi les solutions technologiques mobilisables, on trouve le captage et le stockage du carbone. Innovation la plus à même de capter les émissions fatales de l'industrie, elle est un atout véritable, dont les limites techniques, économiques et sociétales nous forceront à l'utiliser là où ce sera le plus efficient. Son potentiel, identifié, doit ainsi être mobilisé prioritairement pour décarboner l'industrie lourde.

Seule la combinaison des trois types de leviers à disposition – progrès continu, technologies de rupture et sobriété – permettra d'assurer une transformation à la hauteur des objectifs nationaux de décarbonation.

## Le plan de transformation de l'économie française

**Le plan de transformation de l'économie française (PTEF) de The Shift Project vise à proposer des solutions pragmatiques pour répondre à la double contrainte carbone – réduire les émissions liées à nos activités et nous affranchir presque totalement des énergies fossiles –, secteur par secteur, en favorisant la résilience et l'emploi.**

L'élaboration du PTEF repose sur quatre piliers :

- adopter une approche globale, systémique et cohérente du point de vue des lois de la physique et de la technique, et des flux économiques ;
- s'intéresser aux vraies ressources rares : les ressources physiques et les compétences, l'emploi étant au cœur du dispositif ;
- faire des propositions pragmatiques, opérables dès à présent, de façon à ouvrir un chemin de décarbonation réaliste et cohérent au sein d'une transformation de long terme qui impose un rythme de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES), qui soit, dès aujourd'hui, d'environ 5 % par an en moyenne ;
- ne pas construire une trajectoire qui reposerait sur le pari de la croissance économique comme phénomène exogène, ou sur des évolutions technologiques supposées advenir mais non encore éprouvées.

Davantage qu'un scénario, le PTEF est une méthodologie de traitement de la transition carbone-énergie, combinant deux approches :

- l'approche sectorielle, laquelle s'appuie sur les leviers de décarbonation identifiés pour chaque secteur (mobilité quotidienne, mobilité longue distance, logement, santé, culture, administration publique, fret, industrie), ainsi que sur des réalités opérationnelles, en matière d'activité et d'emploi ;
- et l'approche transverse, qui permet de donner une vision globale de l'économie et de sa transformation, au travers de trois angles de lecture : l'emploi, les flux d'énergie et les flux de matières. En croisant les transformations proposées par chaque secteur, ce travail assure la cohérence physique du PTEF et sur le plan des emplois. Les ressources utilisées par certains secteurs ne peuvent l'être par d'autres (par exemple, la biomasse ou bien la disponibilité en hydrogène, laquelle notamment est limitée par les capacités du système électrique). Transformer l'économie, ce n'est donc pas se contenter d'aligner les leviers disponibles pour chaque activité, mais bien de comprendre où seront les arbitrages à faire : quel degré de transformation pour quelle activité ? Quel choix faire sur le plan de notre dépendance aux flux physiques nécessaires à la transformation ? Etc. C'est tout cela que permet l'approche du PTEF : lister les questions-clés à traiter à l'échelle collective pour choisir une direction à la fois viable dans ses objectifs et sa faisabilité.

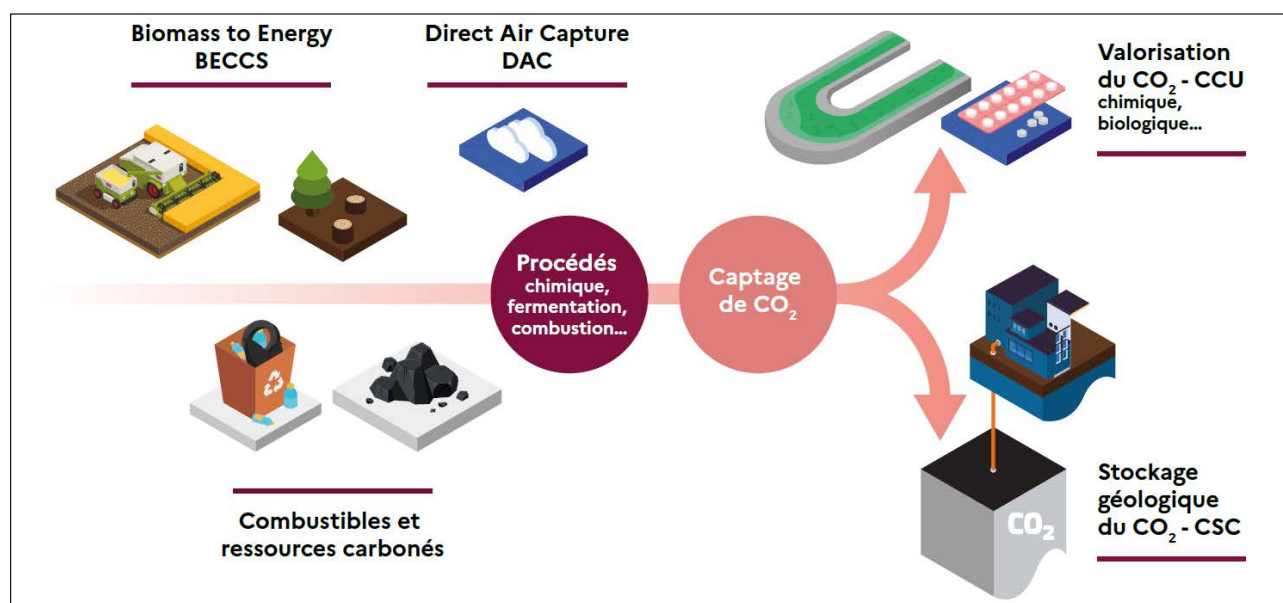


Figure 1 : Les différentes technologies associées au CCS : CCU, BECCS et DAC – Source : ADEME, 2020 [1].

## Le CCS : un atout essentiel pour la décarbonation de l'industrie

### Une technologie mûre, mais au potentiel de déploiement limité

Capter le carbone est l'une des ruptures technologiques régulièrement citées par les feuilles de route de décarbonation de cette dernière décennie. Son principe est simple : il consiste en substance à emprisonner les molécules de dioxyde de carbone présentes dans les effluents gazeux issus d'une installation industrielle (une centrale thermique au charbon, au fuel ou au gaz, une aciérie, une cimenterie, une raffinerie...), pour les faire ensuite migrer soit vers un site de stockage, soit vers un site de traitement pour être réutilisés pour d'autres usages.

Les technologies aujourd'hui à l'étude se répartissent entre trois processus de captation du carbone, et deux types de traitement.

#### Les processus de captation du dioxyde de carbone

- le carbone peut être issu de la combustion d'énergies fossiles ou de procédés de production (chimie de l'ammoniac, production du clinker, etc.), dont les fumées sont captées en sortie d'usine, avant d'être traitées pour en extraire le CO<sub>2</sub><sup>1</sup> ;

<sup>1</sup> Dans les procédés de précombustion, la combustion est partielle et réalisée avec de l'eau, ce qui conduit notamment à la synthèse de l'hydrogène et du CO<sub>2</sub>, qui doivent ensuite être séparés pour être stockés ; c'est l'hydrogène dit « bleu ».

Les procédés de postcombustion consistent à capturer le CO<sub>2</sub> contenu dans les effluents gazeux d'installations industrielles. Par ailleurs, les procédés d'oxycombustion utilisent comme comburant non pas l'air mais l'oxygène, lequel doit donc être préalablement extrait de l'air (par cryogénie, notamment), de manière à ce que les gaz de combustion contiennent uniquement du CO<sub>2</sub> et de l'eau. Il suffit donc de les déshydrater avant leur transport et leur stockage.

Enfin, il existe des technologies de capture spécifiques à certains procédés de production (chimie de l'ammoniac, production du clinker, etc.).

- les procédés dits « Biomass to Energy with CCS (BECCS) » permettent de capter le carbone dit « biogénique », issu des fumées de combustion de sites de production utilisant uniquement la biomasse comme combustible. Cette méthode permet d'utiliser la croissance végétale comme mécanisme de captation du carbone de l'air ambiant et de s'en servir comme puits de carbone ;
- le « Direct Air Capture (DAC) » ambitionne, quant à lui, de capter directement le dioxyde de carbone dans l'air ambiant à l'aide d'installations industrielles dédiées.

#### Les deux types de traitement

- le CO<sub>2</sub>, une fois capté, peut être transporté, puis stocké de façon permanente dans des structures géologiques profondes, comme des aquifères ou des réservoirs de pétrole ou gaz déplétés. C'est la technologie dite CCS ;
- le CO<sub>2</sub> peut sinon être réutilisé dans des processus industriels de valorisation du carbone ou d'utilisation de celui-ci, directement ou après transformation chimique afin de produire de nouvelles matières ou des combustibles de synthèse : c'est le CCU (Carbon Capture and Utilisation).

**Dans le PTEF, les technologies mobilisées relèvent uniquement du captage du carbone issu des fumées d'usines recourant à des combustibles fossiles et de son stockage géologique.** Le captage du carbone n'a pas vocation à servir de puits de carbone à grande échelle et à permettre d'atteindre la neutralité en 2050 en retirant du CO<sub>2</sub> aujourd'hui présent dans l'atmosphère, mais plutôt à alléger la part de réduction des émissions de l'industrie devant reposer sur la minoration des volumes de production.

Les procédés reposant sur la soustraction de carbone de l'atmosphère (BECCS et DAC) affichent des probabilités de viabilité différentes :

- le DAC reste aujourd'hui un pari technologique très incertain : certaines de ses technologies essentielles n'atteignent pas aujourd'hui le degré de maturité nécessaire pour être déployées à l'échelle industrielle au cours des cinq à trente prochaines années (par exemple, l'efficacité insuffisante des filtres nécessaires pour capter un volume suffisant de carbone dans l'air, ou bien encore le manque actuel de données sur l'énergie nécessaires à la production et l'opération de ces systèmes) [1] ;
- les technologies liées au BECCS sont majoritairement matures : néanmoins, elles s'appuient sur une utilisation particulière de la biomasse, dont les conditions de viabilité au sein d'une économie qui se transforme restent à instruire. La biomasse et les surfaces nécessaires à la produire font partie des ressources sur lesquelles il existe des tensions grandissantes dans le cadre d'un report vers les énergies et matériaux décarbonés (comme le bois pour la construction ou la biomasse pour la production d'énergie<sup>2</sup>).

Selon le Global CCS Institute, les projets de CCS aujourd'hui en construction ou faisant l'objet d'un développement avancé représentent, au niveau mondial, une capacité de stockage totale de près de 40 MtCO<sub>2</sub>/an [2]. Selon l'Ademe, près d'une vingtaine de projets de ce type sont véritablement déployés à l'échelle industrielle, représentant une capacité de stockage totale mondiale de 23 MtCO<sub>2</sub>/an.

Le CCS est donc une technologie présentant un degré de maturité suffisamment avancé pour faire partie de l'équation de la décarbonation. Mais elle ne peut pas être considérée aujourd'hui comme une solution généralisable.

Il s'agit d'une technologie techniquement mûre, mais très intense en capitaux et sur laquelle pèsent de nombreuses incertitudes sur ses capacités d'un passage à l'échelle<sup>3</sup>, d'où la nécessité de trancher au préalable de nombreuses questions d'ordre stratégique :

- quels cadres et organisation des activités de CCS retenir sur le plan opérationnel (localisation des

zones de stockage, déploiement des infrastructures) comme sur le plan juridique (responsabilité du stockage, des fuites éventuelles, etc.) ?

- quels secteurs de l'économie doivent être prioritaires dans l'allocation des possibilités de stockage, si les capacités en sont limitées ?

Le CCU, quant à lui, n'est pas mobilisé dans le PTEF : les conventions d'allocation des émissions peuvent en effet cacher une réduction arithmétique mais non physique de ces dernières, ce qui réclame de disposer d'une documentation plus poussée.

### Le CCS : un levier à utiliser en priorité pour décarboner l'industrie

Le potentiel de captation et de stockage des émissions carbonées en France est évalué par l'Ademe [1], en identifiant les sources de gaz à effet de serre répondant aux critères suivants :

- les sources doivent être fixes. En effet, les sources mobiles (un véhicule, par exemple) ne peuvent pas être raccordées à l'infrastructure nécessaire pour le traitement, le transport et le stockage ;
- la concentration des fumées des sites doit être suffisante pour permettre le captage des molécules de CO<sub>2</sub> par les solvants<sup>4</sup>. Et la quantité de carbone émis par l'installation doit être supérieure à 100 ktCO<sub>2</sub>/an pour assurer la viabilité technico-économique du déploiement ;
- la conformation et la localisation des sources doivent être compatibles avec les contraintes de mise en place des dispositifs de captage et la faisabilité de l'implantation des infrastructures de transport au vu de l'emplacement des sites de stockage.

Dans une économie française souhaitant s'engager dans une stratégie visant à rendre sa production d'électricité indépendante des énergies fossiles, les seules installations correspondant aux critères précités sont celles de l'industrie lourde. Le potentiel évalué par l'Ademe de captation des émissions de l'industrie en France s'élève à 24 MtCO<sub>2</sub>/an.

Parmi les sites industriels les plus concernés, les installations relevant des filières de production de ciment, d'acier et d'ammoniac sont particulièrement éligibles au déploiement du CCS<sup>5</sup> :

- leurs procédés sont en effet très intenses en carbone. Il s'agit en outre d'installations présentes dans les grandes régions porteuses de cette technologie ou connectées à des sites de stockage géologique viables (le pourtour nord du territoire français avec notamment la proximité des structures géologiques présentes dans les eaux voisines de la mer du Nord – en Norvège, au Royaume-Uni ou aux Pays-Bas –,

<sup>2</sup> Ces dynamiques de croissance du recours au bois dans la construction sont décrites dans les travaux portant sur la filière Ciment-Béton et au sein du rapport de The Shift Project intitulé « Habiter dans une société bas-carbone – Dans le cadre du Plan de transformation de l'économie française », publié en octobre 2021.

<sup>3</sup> Le déploiement d'infrastructures de captage et de stockage réclame des investissements financiers et matériels très conséquents : production et opération des dispositifs de captage en sortie des cheminées, déploiement d'une infrastructure de transport et de stockage d'envergure comparable à celle de certaines installations pétrolières, nécessité d'assurer la surveillance des sites de séquestration pour limiter les risques de catastrophes naturelles liés. Les effets d'échelle sont, de plus, complexes à atteindre dans la phase de captage, notamment en ce qui concerne l'intégration des dispositifs de captage, laquelle nécessite une adaptation systématique aux spécificités du site industriel, des caractéristiques de ses cheminées et de la nature de ses évacuations (ADEME, 2020) [1]. D'où la pertinence d'utiliser à court terme les infrastructures existantes pour le stockage, notamment en mer du Nord ou en région Aquitaine.

<sup>4</sup> La technologie de postcombustion par captage aux amines est aujourd'hui la plus mature et est largement déployée.

<sup>5</sup> Les installations de production d'électricité au gaz, charbon ou pétrole ne sont pas listées ici, en ce qu'elles ne font pas partie d'un mix électrique français transformé dans une logique d'indépendance vis-à-vis des énergies fossiles en tant que telles.

et, dans une moindre mesure, la région Aquitaine et le quart sud-est de la France avec les aquifères salins profonds que l'on trouve dans le sous-sol de ces régions) ;

- leurs émissions carbonées sont des produits indésirables issus directement des procédés de production utilisés dans les secteurs considérés. Ces émissions resteront donc incompressibles même dans une société transformée, puisque celle-ci continuera de recourir au ciment, à l'acier et aux produits issus de la chimie.

**Le CCS est une technologie puissante, mais complexe à mettre en œuvre**, du fait qu'elle combine des innovations fortes dans chacune des phases de son *process* (captage, transport, stockage), qu'elles soient d'ordre technique (chimie des amines, captage par le froid, gestion et sécurité des sites de stockage, etc.), réglementaire (droit international pour le stockage *offshore*, etc.) ou sociétal (acceptabilité du stockage sur le territoire concerné, implantation de lourdes infrastructures, etc.).

L'enjeu est donc de faire de cette technologie l'atout majeur qu'elle peut être : et ce, en rendant son application possible à la bonne échelle (grâce à un pilotage de son déploiement, à l'évolution des sites industriels, à la mutualisation des infrastructures) et en l'utilisant prioritairement sur les industries dont les émissions de procédés sont très importantes.

Le PTEF déploie donc cette technologie de manière réaliste, mais tout en étant ambitieux, en privilégiant son utilisation pour les cimenteries, la production d'ammoniac et la sidérurgie, avec des capacités de captage estimées respectivement à :

- 1 MtCO<sub>2</sub>/an pour les sites de production de l'industrie cimentière ;
- 2 MtCO<sub>2</sub>/an pour les sites de production de l'industrie chimique ;
- 4 MtCO<sub>2</sub>/an pour ceux de l'industrie sidérurgique.

Cette capacité totale de 7 MtCO<sub>2</sub>/an, construite sur la base des potentiels identifiés par l'Ademe et des considérations de faisabilité développées dans nos analyses sectorielles, correspond à l'ordre de grandeur du potentiel déterminé pour cette technologie dans le cadre de la SNBC (environ 5 MtCO<sub>2</sub>/an) [3].

## Rendre possibles les ruptures et préparer notre industrie à la sobriété

L'industrie représente près d'un cinquième des émissions territoriales françaises, soit bien plus que son poids économique. La chimie, la métallurgie (principalement la sidérurgie, c'est-à-dire la production d'acier) et l'industrie des matériaux de construction (principalement le ciment) représentent à elles seules les trois-quarts des émissions du secteur de l'industrie [4].

À la fois colonne vertébrale et secteur à part entière de l'économie, l'industrie est confrontée à un double enjeu. Elle doit permettre aux autres secteurs de se transfor-

mer – en produisant les biens et infrastructures dont ils ont besoin pour décarboner leurs activités –, tout en s'assurant que sa propre production soit elle-même décarbonée et presque totalement indépendante des intrants fossiles.

Seule une combinaison des trois familles de leviers précitées permettra d'atteindre l'objectif de réduction de 80 % des émissions carbonées du secteur de l'industrie en 2050. Ces leviers sont donc :

- le progrès continu (efficacité énergétique, changement de combustibles pour les fours, recyclage mécanique, etc.), qui doit permettre d'assurer 40 % du chemin total de la décarbonation du secteur ;
- la mobilisation des leviers de rupture technologique (recours à l'hydrogène produit par électrolyse, recours au CCS, recyclage chimique, etc.), qui permettront eux aussi d'assurer 40 % du chemin total de la décarbonation du secteur ;
- et, enfin, les leviers de sobriété (sobriété en ce qui concerne les emballages plastiques, les constructions neuves, etc.), assurant les 20 % restants.

**S'agissant des ruptures technologiques identifiées, celles-ci ne se produiront que si certaines initiatives politiques se concrétisent** véritablement. Il est en effet nécessaire de construire le cadre réglementaire et stratégique grâce auquel ces innovations pourront advenir à grande échelle. Il s'agit :

- d'orienter prioritairement la production d'hydrogène vers l'industrie lourde, plus précisément la sidérurgie et l'industrie des engrais, et de dimensionner le système électrique pour qu'il soit capable d'absorber la nouvelle demande qui découlera de cette réorientation ;
- de déployer des normes performantielles ambitieuses et ciblées ;
- de mettre en place des outils de gouvernance aux niveaux national et européen, qui permettent de ne pas saborder l'industrie française devenue décarbonée, face à des industries extérieures fortement émissives mais bon marché.

Bien que la transformation de l'industrie envisagée dans le PTEF soit parfois plus ambitieuse que celle découlant des feuilles de route sectorielles sur la mobilisation des leviers technologiques, elle ne doit pas faire oublier la nécessaire adaptation de notre industrie à une sobriété inévitable à un double titre. Inévitable en ce qu'elle découle des contraintes qui s'imposent aux autres secteurs, situés en aval, qui ne pourront atteindre leurs propres objectifs qu'en recourant à une part de cette sobriété. Inévitable aussi en ce qu'elle est indispensable à l'industrie elle-même pour qu'elle puisse se placer sur la bonne trajectoire au regard de sa décarbonation.

De plus, **les technologies de rupture constituent des opportunités à pousser, mais elles restent un pari**. Les risques d'échec étant bien plus forts pour les technologies de rupture que pour les leviers de progrès continu, il est essentiel de comprendre qu'il doit être

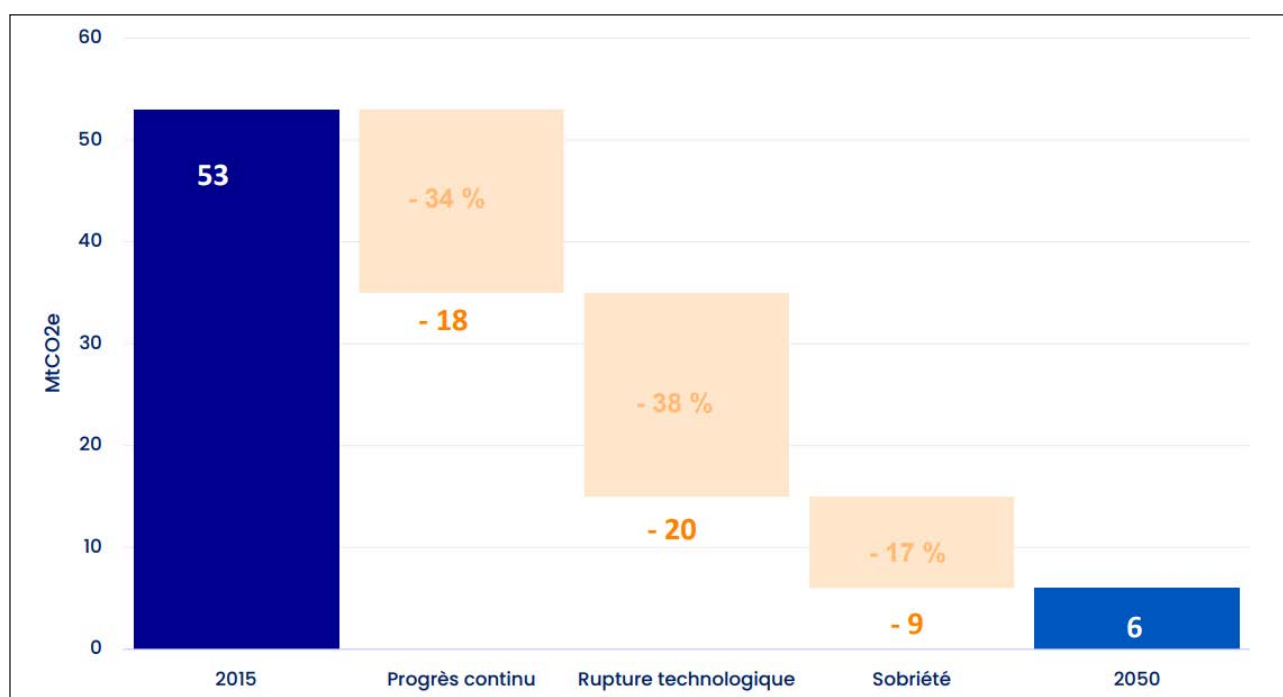


Figure 2 : Évolution entre 2015 et 2050 des émissions GES du secteur de l'industrie lourde en France, en MtCO<sub>2e</sub> – Source : calculs de The Shift Project réalisés dans le cadre du PTEF.

envisagé de recourir à une sobriété plus intense si le déploiement des premières échoue dans les années à venir. Pousser leur développement devra donc s'accompagner de celui d'outils de suivi, devant permettre de détecter suffisamment tôt un écart trop grand dans leur mobilisation par rapport à la trajectoire de décarbonation. Ceci étant, un tel déploiement ne devra en rien nous affranchir de préparer l'adaptation de notre industrie à une plus grande sobriété.

changement-climatique-et-energie/69-avis-de-l-ademe-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france.html

[2] GLOBAL CCS INSTITUTE (2021), "Global status of CCS 2021 – CCS accelerating to net zero", <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

[3] MTEES (2020), « Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) », <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

[4] CITEPA (2021), « Données d'émissions et rapports d'inventaire », <https://www.citepa.org/fr/telechargements/>

## Bibliographie

[1] ADEME (2020), « Avis de l'Ademe – Captage et stockage géologique du CO<sub>2</sub> (CSC) en France », <https://librairie.ademe.fr/>