

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂



FEUILLE DE ROUTE STRATÉGIQUE

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Sommaire

> 1. Champ de la feuille de route	7
> 2. Benchmark international	10
> 3. Les enjeux	13
> 4. Les paramètres clés	14
> 5. Les visions	15
> 6. Les verrous	20
> 7. Les priorités de recherche	22
> 8. Le déploiement des technologies	37

Liste des membres du groupe d'experts¹

Nature de l'organisme	Experts	Organismes d'appartenance
Organismes de recherche	Pierre Agrinier Didier Bonijoly Régis Farret Eric Favre Minh Ha Duong François Kalaydjian Jacques Pironon	IPGP BRGM Ineris ENSIC – INPL Nancy Cired IFP Energies nouvelles CNRS/Université de Lorraine
Entreprises privées	Jean-Pierre Birat Valérie Czop Marc David Luc de Marliave Robert Gresser Pierre Le Thiez Louis Sonnois Arnaud Van Der Beken	ArcelorMittal EDF Air Liquide Total Rhodia Geogreen Alstom Schlumberger
Organismes publics	Isabelle Czernichowski François Moisan	ANR ADEME

¹ - Le groupe d'experts a reçu l'appui d'un secrétariat technique composé de Stéphanie Arnoux, Karine Filmon, Albane Gaspard, Michel Gioria et Nathalie Thybaud de l'ADEME.

Préambule

Depuis 2010, l'ADEME gère quatre programmes dans le cadre des Investissements d'avenir². Des groupes d'experts issus de la recherche dans les secteurs de l'industrie, des organismes de recherche et des agences de financement et de programmation de la recherche, sont chargés, dans le cadre d'un travail collectif, de la réalisation de feuilles de route stratégiques. Celles-ci sont utilisées pour lancer les Appels à manifestation d'intérêt (AMI). Les feuilles de route ont pour objectif :

- d'éclairer les **enjeux industriels, technologiques, environnementaux et sociétaux** ;
- d'élaborer des **visions cohérentes et partagées** des technologies ou du système sociotechnique en question ;
- de mettre en avant les **verrous technologiques, organisationnels et socio-économiques** à dépasser ;
- d'associer aux thématiques de recherche prioritaires, **des objectifs temporels** en termes de disponibilité technologique et de déploiement ;
- de rendre prioritaires les **besoins de recherche industrielle, de démonstrateurs de recherche, d'expérimentation préindustrielle et de plates-formes technologiques d'essai** qui servent ensuite de base pour :
 - > la rédaction des AMI ;
 - > la programmation de la recherche au sein de l'ADEME et d'autres institutions comme l'Agence nationale de la recherche (ANR), le Comité stratégique national sur la recherche énergie ou l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE).

Ces priorités de recherche et d'expérimentation proviennent du croisement entre les visions et les verrous, mais prennent également en compte les **capacités françaises dans les domaines de la recherche et de l'industrie**.

Le cas échéant, ces feuilles de route peuvent également inclure une partie **benchmark international** se focalisant sur les démonstrateurs mis en œuvre dans les pays particulièrement actifs dans le domaine ainsi que des recommandations en matière de politique industrielle.

2 - Les Investissements d'avenir s'inscrivent dans la continuité des orientations du Fonds démonstrateurs de recherche géré par l'ADEME. Les quatre programmes concernés sont : Energie renouvelable, décarbonée et chimie verte (1,35 milliard d'euros), Véhicules du futur (1 milliard d'euros), Réseaux électriques intelligents (250 millions d'euros) et Economie circulaire (250 millions d'euros).

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Réduire les émissions de gaz à effet de serre

L'entrée en vigueur du protocole de Kyoto, en 2005, est un acte fondateur dans la **prise en compte des émissions de gaz à effet de serre** (GES)³. Ces gaz absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et sont jugés responsables de la perturbation du système climatique. Le dioxyde de carbone (CO₂) est, en quantité, le principal gaz à effet de serre anthropique, produit par l'activité humaine.

En raison de l'utilisation massive de combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon), les concentrations en GES augmentent depuis le XIX^e siècle, en particulier celles en CO₂, dont les émissions ont progressé de 80 % environ entre 1970 et 2004⁴ (en 2004, elles étaient évaluées à 26 milliards de tonnes). La concentration atmosphérique en CO₂ est évaluée à 379 ppm⁵. Sa croissance annuelle est proche de 2 ppm et ne s'atténuera que progressivement, même si nous supprimons toute émission, les GES ayant des durées de séjour dans l'atmosphère plus ou moins longues.

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (**GIEC**) des Nations unies considère qu'il faut, à l'horizon 2050, **diminuer les émissions mondiales de CO₂ de 50 à 85 %, par rapport aux niveaux de 2000**, pour limiter l'augmentation des températures moyennes mondiales à long terme à un niveau compris entre 2 °C et 2,4 °C par rapport à l'ère préindustrielle, seuil considéré comme critique⁴. Cela suppose de ne pas dépasser une concentration atmosphérique de **450 ppm de CO₂**.

Selon l'**Agence internationale de l'énergie** (AIE)⁶, pour diviser par deux les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie à l'horizon 2050 par rapport aux niveaux de 2005 (scénario dit Blue Map), il faut avoir ramené les émissions annuelles mondiales à 14,6 milliards de tonnes (Gt) en 2050 soit, pour une population actuelle de 6,5 milliards d'habitants, 2,2 tonnes de CO₂ par habitant et par an.

La **France**, avec 65 millions d'habitants, aurait droit, pour une répartition proportionnelle au nombre d'habitants, à 143 millions de tonnes (Mt), soit un peu plus d'un quart de ses émissions actuelles. Cet ordre de grandeur, qualifié de « **facteur 4** » a été intégré dans la vie politique par le Premier ministre Jean-Pierre Raffarin lors de l'ouverture de la 20^e session plénière du GIEC, le 19 février 2003 à Paris, lorsqu'il a déclaré : « Il faut diviser par deux les émissions de GES avant 2050 à l'échelle de la planète » ; pour la France, pays industrialisé, « cela signifie une division par quatre ou par cinq ». Cet objectif, division par quatre des émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990, a été repris dans l'article 2 de la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique du 13 juillet 2005.

La **division par 4 à l'échelle de la France** et par 2 à l'échelle du monde des émissions de GES nécessitera d'activer **au cours des 20 à 30 prochaines** années une gamme cohérente de mesures (mécanismes économiques, réglementation, cadre institutionnel) dans l'ensemble des six secteurs émetteurs de GES (agriculture et pêche, production d'énergie, industrie manufacturière, bâtiments résidentiels et tertiaires, transports et utilisation des terres).

Or, la croissance de la population et de la richesse mondiale conduisent à une demande d'énergie qui, sans mesures ambitieuses, passeraient d'environ 11 à 25 milliards de tonne équivalent pétrole d'ici à 2050⁷, dont une grande proportion en énergies fossiles. Afin de limiter les conséquences de cette croissance des besoins énergétiques sur le climat, il est nécessaire de mettre en œuvre un panel de solutions pour diversifier les ressources énergétiques et réduire de façon massive les émissions anthropiques de GES (encadré ci-dessous). Parmi elles, une solution consiste à **capturer le CO₂** émis en grande quantité lors de processus industriels tels que la production d'électricité, d'acier ou de ciment, pour **le stocker dans le sous-sol** afin de l'isoler de l'atmosphère. Cette solution concerne donc les sources fixes émettant du CO₂. Elle est ici évoquée sous le sigle de **CSC** pour **Captage et Stockage géologique de CO₂**.

3 - Six gaz à effet de serre sont pris en compte dans le protocole de Kyoto : dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), protoxyde d'azote (N₂O), perfluorocarbures (PFC), hydrofluorocarbures (HFC), hexafluorure de soufre (SF₆).

4 - « Changements climatiques 2007 », rapport de synthèse, Giec.

5 - Partie par million.

6 - L'AIE établit des scénarios d'évolution du système énergétique mondial à l'horizon 2050, actualisés dans la nouvelle édition de son rapport « *Energy Technology Perspectives* » (ETP, 2010).

7 - World Energy Outlook, 2009

Options mobilisables pour réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre

Plusieurs mesures complémentaires doivent absolument être considérées :

- réduction de la consommation énergétique dans les bâtiments, les transports, l'industrie...
- utilisation d'énergies non émettrices de gaz à effet de serre (solaire, éolien, énergie hydraulique, géothermie, nucléaire...),
- utilisation d'énergies fossiles moins émettrices pour une même production (gaz naturel au lieu de charbon), avec un recours probable aux technologies de captage et stockage de CO₂,
- amélioration du rendement énergétique des moyens de production d'électricité à partir d'énergies fossiles (gaz ou charbon), en utilisant les meilleures technologies disponibles pour concevoir de nouvelles centrales, et en augmentant le rendement des centrales existantes, par exemple, par des réhabilitations,
- développement des puits naturels de carbone,
- captage et stockage géologique du CO₂.

Le potentiel le plus important de limitation des émissions anthropiques de GES concerne l'**utilisation finale rationnelle des combustibles et de l'électricité**. Dans le scénario Blue Map de l'AIE, elle compte pour **38 % des émissions mondiales évitées à l'horizon 2050** par rapport à un scénario de référence (tendanciel) sans changements importants dans la politique énergétique actuelle (Figure 1). Le **captage et le stockage géologique du CO₂** (appliqués à la production d'électricité et aux industries de transformation) permettraient **19 % de réduction des émissions mondiales en 2050**.

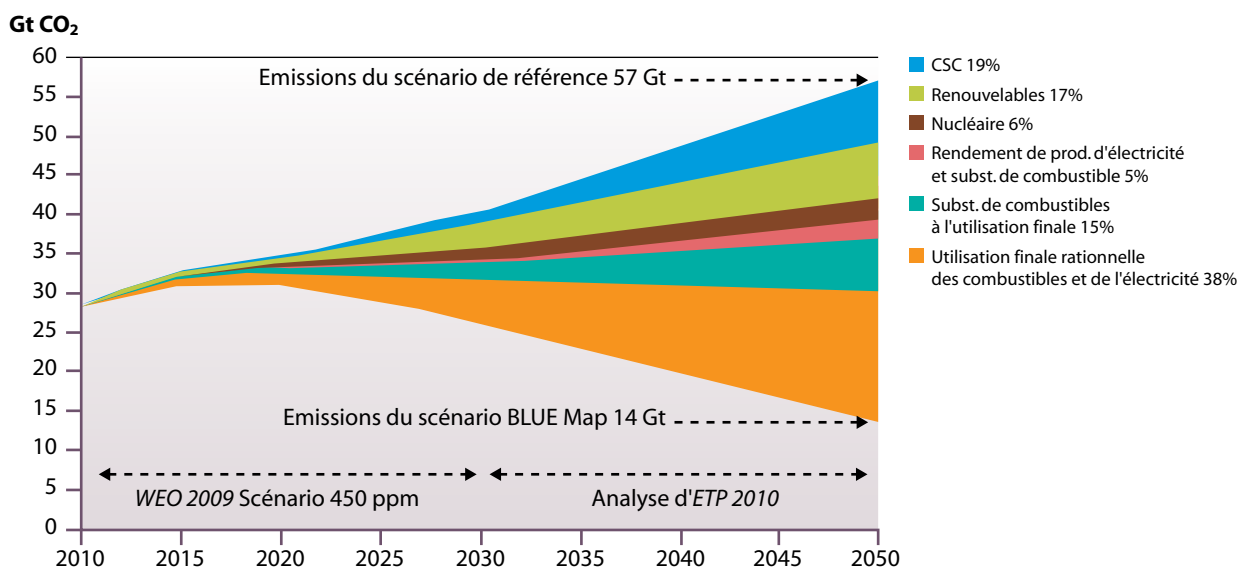


Figure 1 : Options de réduction des émissions de CO₂, 2005-2050 (source AIE)

Au **niveau européen**, selon les premières estimations de l'impact de la directive relative au **stockage géologique de CO₂** (2009/31/CE), les **émissions de CO₂ évitées en 2030** représenteraient environ **15 % des réductions requises dans l'Union européenne**, soit 160 millions de tonnes de CO₂ stockées annuellement. L'exploitation maximum du potentiel du captage et du stockage géologique du CO₂ pourrait permettre de réduire de **plus de 50 % les émissions de CO₂ à l'horizon 2050**, avec une réduction d'environ 30 % pour le seul secteur de la production d'énergie⁸.

8 - Plate-forme technologique européenne ZEP (European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants) « Captage et stockage du CO₂ (CCS) – De l'importance de lutter contre le réchauffement planétaire », 2008.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Pour la **France**, une première analyse, à partir des émissions actuelles de la production d'électricité, mais aussi des émissions industrielles concentrées, énergétiques et non énergétiques (comme la décarbonatation), fixe les ordres de grandeur : environ 75 millions de tonnes de CO₂ par an sont potentiellement concernées par le CSC, soit environ **19 % des émissions** de CO₂ en France évaluées à 395 millions de tonnes⁹ (hors utilisation des terres, leurs changements et la forêt¹⁰). Une évaluation technico-économique et environnementale¹¹ a montré qu'à **l'horizon 2050** le stockage du CO₂ appliqué aux sources concentrées de CO₂ (usines d'ammoniac...) et aux sources fixes émettant plus de 0,9 MtCO₂/an pouvait permettre de réduire les émissions de ces secteurs de **33 à 54 %**, selon le nombre de bassins industriels impliqués (Lorraine, basse Seine, région parisienne, Nord-Pas-de-Calais, Provence-Alpes-Côte d'Azur). Pour atteindre le facteur 4 dans le secteur industriel français en 2050, la technologie CSC doit être mise en œuvre dès 2020. Selon cette hypothèse, la disponibilité de sites de stockage pour un volume cumulé entre 2020 et 2050 de 1 milliard de tonnes de CO₂ serait nécessaire.

En complément du stockage géologique mais pour des quantités bien moins importantes, **le CO₂ peut être valorisé comme matière première**. A l'heure actuelle, il est déjà utilisé dans la chaîne agroalimentaire pour la conservation des aliments (glace sèche) ou les boissons gazeuses. Il est utilisé industriellement, comme réactif dans l'industrie chimique, pour des applications industrielles (fluides réfrigérants, solvants...) ou pour la récupération assistée d'hydrocarbures (RAH, EOR/EGR en anglais pour *Enhanced Oil/Gas Recovery*¹²). En **2008**, environ **150 millions de tonnes de CO₂ étaient valorisées dans le monde** (dont 40 millions de tonnes injectées annuellement pour la récupération assistée de pétrole). Cela représente **0,5 % des émissions de CO₂ anthropiques annuelles**¹³ (figure 2). L'enjeu principal de la valorisation du CO₂ consiste à trouver de nouvelles applications en s'appuyant sur des technologies de rupture permettant d'augmenter les volumes concernés.

Pour la valorisation, le CO₂ est stocké définitivement (ex : fabrication de plastiques) ou pour un temps donné (ex : fabrication de biocarburants). On doit alors tenir compte du CO₂ émis lors de l'utilisation du produit issu de la valorisation, par exemple en s'appuyant sur des ACV – analyses de cycle de vie – s'il en existe, afin de raisonner en termes de « CO₂ évité »)

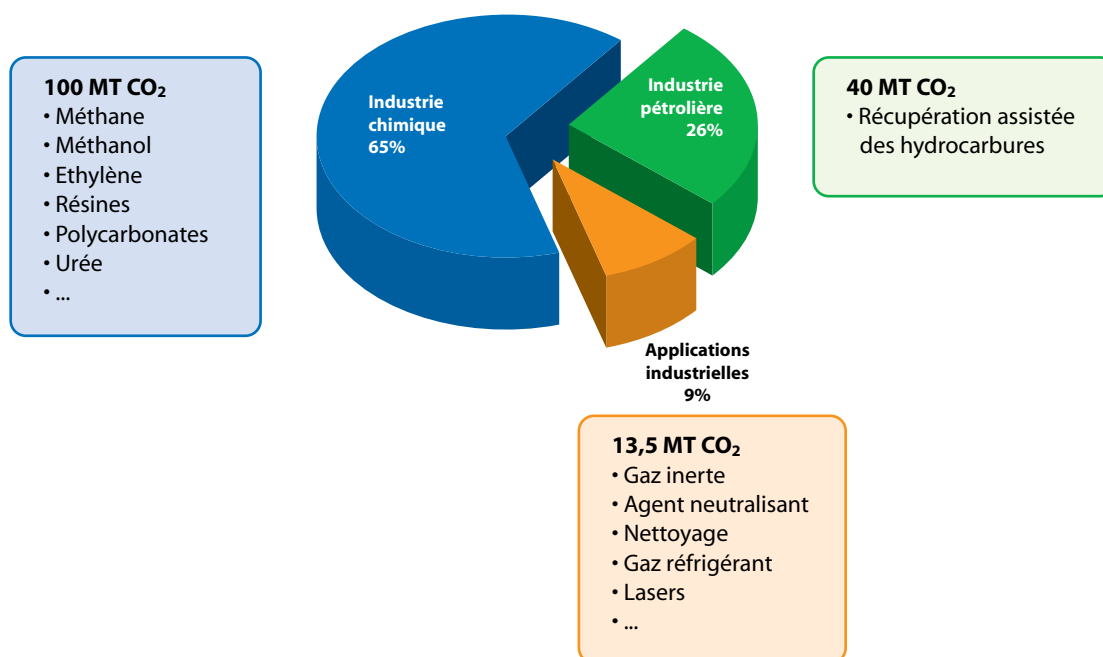


Figure 2 : Utilisation du CO₂ dans le monde - Source : Projet Gestinn, 2008

9 - MEEDDM/CITEPA/Inventaire CCNUCC – Avril 2010.

10 - Les émissions de CO₂ sont exprimées avec ou sans UTCF (utilisation des terres, leurs changements et la forêt). Cette notion couvre la récolte et l'accroissement forestier, la conversion des forêts (défrichement) et des prairies ainsi que les sols, dont la composition en carbone est sensible à la nature des activités auxquelles ils sont dédiés (forêts, prairies, terres cultivées).

11 - Rapport ANR SoceCO₂ : « Evaluation technico-économique et environnementale de la filière captage, transport, stockage du CO₂ à l'horizon 2050 en France », 2009.

12 - Le CO₂ est injecté dans les gisements de pétrole ou de gaz pour améliorer leur extraction. En phase d'exploitation, une partie du CO₂ est stocké dans l'espace libéré par l'hydrocarbure et une partie ressort avec l'hydrocarbure avant d'être séparé et réinjecté dans le système.

13 - Projet Gestinn de Laurent Dumergues, 2008.

> 1. Champ de la feuille de route

Champ thématique

Cette feuille de route sur le **captage, le transport, le stockage et la valorisation du CO₂** (ou **CSCV**) couvre les technologies :

- de **captage** du CO₂, appliquées aux **chaudières industrielles ou aux filières de production d'électricité et/ou d'hydrogène** :
 - > captage en **postcombustion** : il vise à séparer le CO₂ des fumées de combustion à l'aide de technologies d'absorption (solvants chimiques type amines, solvants physiques, ammoniac refroidi...), de cryogénie, d'adsorption, de cycle calcium, etc... ;
 - > captage par **oxycombustion** : il consiste à réaliser une combustion en présence d'oxygène à la place de l'air pour produire des fumées plus concentrées en CO₂, qu'on peut alors séparer, par refroidissement, de la vapeur d'eau avec laquelle il est mélangé ; l'oxygène utilisé peut être produit de manière conventionnelle, par distillation cryogénique, ou en utilisant un oxyde métallique (technique de la « boucle chimique » ou CLC en anglais pour *Chemical Looping Combustion*) ;
 - > captage en **précombustion**, spécifique aux filières de reformage du gaz, de gazéification du charbon ou de biomasse : plutôt que de subir une combustion directe, le combustible est transformé en gaz de synthèse, un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène, converti ensuite en un mélange de CO₂ et d'hydrogène. La séparation du CO₂, plus aisée que dans les fumées de combustion, génère de l'hydrogène qui peut ensuite être brûlé pour produire de l'électricité ou être utilisé dans la production chimique ou la production de carburant ;
- de **réduction des émissions de CO₂ des procédés industriels type cimenterie, sidérurgie, pétrochimie..., spécifiques à chaque secteur**, en vue du stockage géologique ou de la valorisation du CO₂. Par exemple, l'industrie sidérurgique expérimente, pour la réduction de ses émissions de CO₂, un principe de captage de CO₂ et de recyclage des gaz de haut-fourneau.

Les combustibles considérés pour ces deux axes sont les **combustibles solides** (charbon, lignite, biomasse...), **liquides** (fioul...) et **gazeux** (gaz naturel, gaz de haut-fourneau...) :

- de **compression** et de **traitement** du flux de CO₂ capté afin d'atteindre une composition et une pression adaptées aux phases de transport et de stockage. L'intégration de cette étape dans l'unité de captage favorise une optimisation technico-économique du système global, afin de réduire les consommations énergétiques auxiliaires, par exemple. Cette étape peut néanmoins être envisagée au niveau du transport et/ou de l'injection du CO₂ dans certaines conditions ;
- de **transport** du CO₂ :
 - > par **canalisations** incluant les équipements annexes (station de recompression, stockages tampons éventuels, vannes et soupapes...),
 - > par **bateaux**, incluant les infrastructures de chargement et déchargement ;
- d'**injection** incluant le tubage et les séquences de tubages successifs pour atteindre le lieu de stockage, mais également les techniques de forage ;
- de **stockage géologique** du CO₂ :
 - > dans les **aquifères salins profonds**,
 - > dans des **gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés** ou en phase de déclin,
 - > dans des **veines de charbon profondes**, inexploitable,
 - > dans d'autres types de formations géologiques (**basaltes, roches ultrabasiques...**) ;

Les stockages à terre et en mer seront étudiés. Quel que soit le type de stockage, il est nécessaire de développer :

- des méthodologies de gestion des risques,
- des techniques de fermeture des sites,
- des technologies de monitoring qualitatif (rôle d'alerte) et quantitatif (bilan matière).

Feuille de route

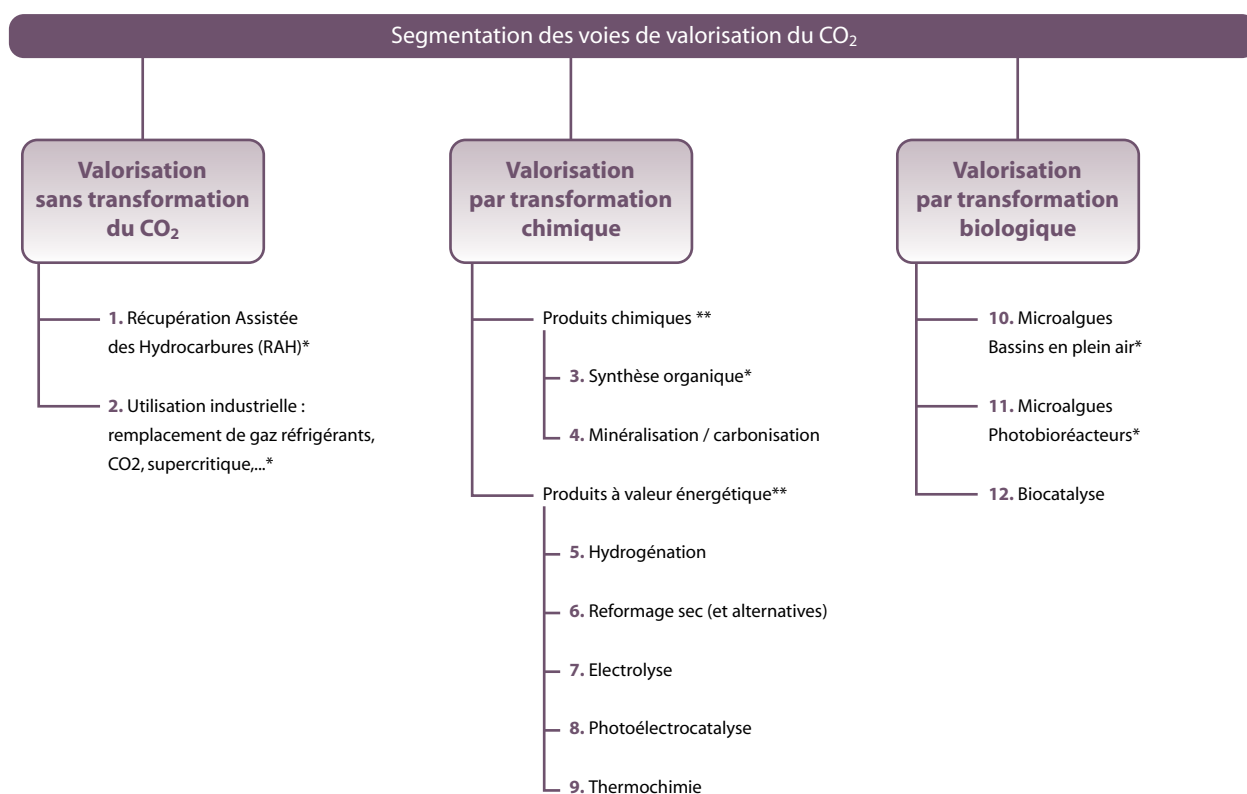
Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

- De **valorisation du CO₂** après captage (figure 3) :
 - > valorisation **sans transformation du CO₂** (récupération assistée d'hydrocarbures, utilisation industrielle : remplacement de gaz réfrigérants, utilisation du CO₂ supercritique comme solvant...),
 - > valorisation **par transformation chimique** pour la synthèse de produits chimiques ou de produits à valeur énergétique,
 - > valorisation **par transformation biologique** (algues, biocatalyse...).

En fonction des voies de valorisation, le CO₂ est stocké pour un temps donné (cas d'un produit à valeur énergétique) ou définitivement (cas de la minéralisation).

Certains procédés de valorisation du CO₂, comme la culture de microalgues pour la production de biocarburants, pourraient envisager d'utiliser directement les fumées de combustion, sans captage.

Sont par contre exclues, au regard des quantités concernées, **les valorisations agricoles ou sylvicoles.**



* Voies pour lesquelles il existe déjà certaines applications à un stade industriel

** Certains produits comme le méthanol sont utilisés comme produits énergétiques ou comme produits intermédiaires de l'industrie chimique

Figure 3 : Les différentes voies de valorisation du CO₂

La feuille de route considère également les impacts environnementaux et sanitaires de l'ensemble de la filière et intègre les questions socio-économiques accompagnant l'émergence et le déploiement à grande échelle du captage, transport, stockage et de la valorisation du CO₂.

Champ géographique et horizon temporel

Champ géographique

Les réflexions du groupe d'experts s'inscrivent, en priorité, dans une perspective de déploiement de la filière à l'international et du positionnement des acteurs français sur le marché mondial. Néanmoins, lorsque cela sera pertinent, des dimensions locales, nationales et européennes pourront être introduites dans la réflexion afin :

- de prendre en compte les **spécificités territoriales ou locales**, liées à la nature des émetteurs, aux infrastructures et aux possibilités de valorisation et/ou de stockage du CO₂,
- d'articuler les **priorités de recherche** et les **besoins de démonstrateurs de recherche** avec les **initiatives européennes**, notamment sur le captage et stockage du CO₂ (avec la plate-forme technologique européenne ZEP, **European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants**¹⁴, le fonds européen pour les démonstrateurs de taille industrielle).

Horizon temporel

En ce qui concerne le stockage géologique, l'objectif est le **confinement permanent** du CO₂, incluant donc la maîtrise à long terme de la filière et de ses impacts potentiels ainsi que la surveillance des sites de stockage pendant le temps nécessaire à la démonstration de leur sûreté. Pour la valorisation, le CO₂ est stocké définitivement ou pour un temps donné.

En ce qui concerne le déploiement de la filière proprement dite (captage, transport, stockage et valorisation du CO₂), on visera dans un premier temps l'horizon 2020, puis **l'horizon 2050, notamment pour être cohérent avec l'objectif facteur 4.**

Les visions 2050 seront donc complétées par une vision 2020, d'une part, pour identifier les **différents scénarios** permettant d'atteindre les objectifs environnementaux européens à l'horizon 2020 (20 % de réduction des gaz à effet de serre, 20 % d'utilisation d'énergies renouvelables et 20 % d'amélioration de l'efficacité énergétique) et, d'autre part, pour illustrer l'articulation entre les étapes de déploiement de la filière CSCV et le cadencement imposé par la mise en place et les révisions successives du système européen d'échange de quotas, ou ETS en anglais pour "Emission Trading Scheme" (encadré ci-dessous).

Le système européen d'échanges de quotas

La directive sur l'échange des quotas d'émissions de CO₂ s'applique depuis le 1er janvier 2005 aux 25 États membres de l'Union européenne. Elle prévoit que les États allouent des **quotas d'émissions de CO₂** aux entreprises de six secteurs industriels intensifs en GES (production d'énergie, ciment, verre, métaux ferreux, industries minérales, pâtes à papier). Les entreprises assujetties ont ensuite la possibilité d'échanger leurs quotas selon qu'elles sont excédentaires ou déficitaires, de sorte qu'un prix à la tonne de CO₂ se forme sur un marché. À la fin de chaque année, les installations sont tenues de restituer un nombre de quotas correspondant à leurs émissions réelles. Pour en savoir plus : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Systeme-d-echange-de-quotas-.html>

Pour ce qui est du captage, transport et stockage géologique du CO₂, le **déploiement commercial entre 2020 et 2050** pourrait être segmenté de la façon suivante :

- 2020 : le CSC n'est pas déployé à grande échelle, mais les différents maillons de la chaîne sont en mesure d'être commercialisés,
- 2050 : le déploiement de la filière est en cohérence avec les enjeux de réduction des émissions de CO₂. Selon l'AIE, le CSC pourrait contribuer à hauteur de 19 % à l'effort de réduction des émissions de CO₂ à l'échelle mondiale en 2050 (figure 1).

14 - La plate-forme européenne ZEP a été créée en 2005 par la Commission européenne, l'industrie européenne, les ONG, les scientifiques et les écologistes pour promouvoir en Europe les solutions technologiques permettant de produire de l'électricité à partir de combustibles fossiles sans émission de CO₂ d'ici à 2020.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

> 2. Benchmark international

Ce benchmark se focalise sur les politiques de soutien aux projets de recherche et de démonstration et sur les coopérations internationales.

La filière CSC

Les initiatives et projets

Seulement cinq projets intégrés de CSC à grande échelle sont actuellement opérationnels dans le monde.

Quatre projets injectent dans le sous-sol du CO₂ provenant d'installations de production de gaz naturel :

- **Sleipner**, opéré par Statoil en Norvège : stockage en aquifères salins ;
- **In Salah**, opéré par un consortium (BP, Statoil et Sonatrach) en Algérie : stockage en aquifères salins ;
- **Snøhvit**, opéré par Statoil en Norvège : stockage en aquifères salins ;
- **Rangely** aux Etats-Unis : récupération assistée de pétrole (EOR).

Un cinquième projet (**Weyburn-Midale**), opéré par Encana au Canada, capte le CO₂ au sein de l'usine de production de gaz naturel synthétique par gazéification du charbon, « *Great Plains Synfuels* », située aux Etats-Unis, et le transporte au Canada par pipeline pour continuer à exploiter par EOR le champ de Weyburn.

Ces cinq projets alimentent les connaissances de base nécessaires au déploiement du CSC.

On distingue par ailleurs cinq grands pôles de développement du CSC : **l'Australie, les Etats-Unis, le Canada, l'Europe et le Japon**, avec des stratégies et des programmes spécifiques :

1. Etats-Unis

Les projets d'injection de CO₂ concernent la récupération assistée de pétrole, mais aussi des projets de stockage de CO₂ en aquifère et dans les roches basaltiques. Les technologies de captage les plus étudiées sont **la précombustion** sur centrale thermique à gazéification de charbon intégrée à un cycle combiné (ou IGCC pour *Integrated Gasification Combined Cycle*) et **la postcombustion aux amines et à l'ammoniac réfrigéré**, même si l'oxycombustion fait l'objet d'un projet à grande échelle (FutureGen 2). Les projets sont pour la plupart financés par des acteurs privés avec le soutien financier du **DOE** (*Department of Energy*).

2. Canada

Le Canada s'implique sur le stockage en aquifères salins profonds et sur la récupération assistée de pétrole. Les entreprises canadiennes s'intéressent aux technologies de **captage en postcombustion sur centrales** à charbon et au captage du CO₂ provenant **d'usines de sables bitumineux et de raffineries**.

3. Australie

Pour accélérer le déploiement commercial des projets CSC et atteindre ses objectifs de réduction d'émissions de CO₂, le gouvernement australien a **créé en 2009 le GCCSI** (Global Carbon Capture and Storage Institute). **Des projets intégrés de CSC** ont été lancés, dont **un projet dans le champ gazier de Gorgon**. L'Australie s'est également engagée **avec le Japon** sur le projet « *CO₂ Enhanced Coal Bed Methane* » et sur un projet de pilote de captage de CO₂ (0,5 tCO₂/h) utilisant une technologie en postcombustion aux amines et implantée sur la centrale à charbon de Gaobedian (Pékin), opérée par le groupe Huaneng.

4. Japon

Le Japon intensifie son soutien au développement de la filière CSC sur son territoire, mais également par des coopérations avec l'Australie, par exemple. **Les activités de R&D au Japon ont commencé à la fin des années 1980**. Elles incluaient l'étude des différentes options de stockage (ECBM « *Enhanced Coal Bed Methane recovery* »¹⁵, stockage géologique et océanique) ainsi que **des projets de R&D** sur le captage par adsorption chimique, membrane et oxycombustion. Des projets de R&D ont été soutenus par le **ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie (METI)**, principalement sur le développement de méthodologies de monitoring pour la sécurité du stockage de CO₂ et sur des études pour faciliter la mise en œuvre du CSC. En 2008, un groupe d'industriels a fondé la société **Japan CCS** pour mener des actions d'investigation pour le déploiement des projets de CSC au Japon. La société est en **phase de sélection de site pour un projet de démonstration**. Par ailleurs, **la Japan Bank of International Corporation peut financer des projets de démonstrateurs CSC à grande échelle** utilisant des technologies japonaises mises en œuvre hors du territoire national.

5. Norvège

Le gouvernement norvégien va investir **326,5 M€** en 2011 pour le **développement de la filière CSC** : financement de **projets R&D**, du **Centre technologique de Mongstad**, du programme de recherche **Climit**, qui travaille sur l'ensemble de la chaîne CSC pour les centrales électriques. Par ailleurs, **deux nouveaux centres de recherche pour le développement du CSC** ont été créés, avec un **budget annuel de 2,3 M€** attribué par le gouvernement.

15 - Ce procédé de récupération assistée de méthane consiste à injecter du CO₂ dans des veines de charbon inexploitées. Celui-ci est adsorbé par le minerai qui libère le méthane jusque-là piégé.

6. Union européenne

L'Europe soutient des projets de recherche sur le captage et le stockage du CO₂ depuis 1993 au sein des **Programmes Cadres de Recherche et Développement (PCRD)**. Le projet pionnier **Joule II** financé par le **3^e PCRD** a permis d'étudier la faisabilité du concept et le projet **SACS**, financé par le **4^e PCRD**, a accompagné la première opération industrielle de stockage en aquifères salins profonds dans le cadre du projet Sleipner en mer du Nord.

Depuis 2000, 49 projets ont été financés au sein des 5^e, 6^e et 7^e PCRD, pour un total de près de **161 M€**, soit 60 % des 270 M€ des sommes engagées dans ces projets. Le dernier programme, le 7^e PCRD, a été lancé en 2007 et se poursuivra jusqu'en 2013.

En 2009, dans le cadre du **plan de relance européen**, la Commission européenne a annoncé le cofinancement de **six projets de démonstration CSC** qui seront localisés en **Allemagne** (projet Jämschwalde), **aux Pays-Bas** (projet de Rotterdam), **en Pologne** (projet Belchatow), **en Espagne** (projet Compostilla), **en Angleterre** (projet Hatfield) **et en Italie** (projet Porto Tolle), pour un montant d'aide total de **1 Md€**. Chacun de ces projets recevra 180 M€ d'aides, excepté pour le projet italien qui ne recevra que 100 M€.

Par ailleurs, l'Union européenne a lancé en **2010** le premier appel d'offres (**NER300**) pour la réalisation de **projets de démonstration de CSC de taille industrielle d'ici à 2015**. L'objectif de la Commission européenne est d'accélérer l'introduction sur le marché de technologies innovantes dans les domaines des énergies renouvelables et du captage et stockage du CO₂. La vente de **300 millions de quotas de CO₂** servira au financement des projets innovants soumis dans ce cadre. Le dispositif européen (Plan de relance et NER300 confondus) financera à hauteur de 50 % au maximum les projets retenus.

Les activités de R&D et les initiatives européennes se sont donc accélérées et intensifiées ces dernières années. En complément de ces actions, **certains Etats Membres** ont développé leurs **propres stratégies et politiques nationales**.

- **L'Allemagne** a financé environ 300 projets de R&D depuis 2004, tout d'abord grâce au programme **Cooretec** « CO₂-Réduction-Technologies » (2004 - 2008) dont le but était de favoriser le développement des technologies permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant des centrales électriques basées sur les combustibles fossiles, puis avec le programme **Geotechnologien** sur le stockage du CO₂ (2005-2011).
- En **Italie**, le CSC a été identifié comme **une thématique prioritaire de recherche** en accord avec **la loi italienne n° 99** sur l'énergie adoptée en **2009** et le **plan national de R&D sur l'Énergie**, dont font partie deux programmes sur le stockage du CO₂.

- En **Espagne**, le montant total investi pour la réduction des émissions de CO₂ s'élève à environ 100 M€ entre 2005 et 2010. L'Espagne soutient actuellement 4 initiatives de R&D et 1 projet de démonstrateur à grande échelle « **Projet COMPOSTILLA** ».
- Au **Pays-Bas**, le gouvernement soutient depuis 2004 à travers différents programmes de recherche, tels que **Cato-1 et Cato-2**, le développement du CSC. Dans le cadre du **plan de relance européen**, le projet hollandais **Maasvlakte** est porté par E.ON et GDF Suez.
- En **France**, les deux principales sources de financement public pour les projets de R&D sont l'**ANR** (Agence nationale de la recherche) et l'**ADEME**.

L'**ANR** a initié en **2005** un programme de recherche thématique sur le captage et le stockage du CO₂. Elle finance **33 projets** pour plus de **27 M€ d'aides**. En 2011, l'ANR relance un **appel à projets** sur le CSC et la valorisation du CO₂ au sein de son nouveau programme Seed (**Systèmes énergétiques efficaces et décarbonés**).

L'**ADEME** a financé, **entre 2001 et 2009, 26 projets de R&D** sur le CSC. En **2008**, l'Agence a lancé un **Appel à manifestation d'intérêt** qui a permis de financer **4 projets de démonstrateurs de recherche** pour une aide globale de **45 M€** :

- > **TGR-BF** : un projet intégré en contexte sidérurgique, opéré par ArcelorMittal ;
- > **France Nord** : un projet sur le stockage géologique du CO₂ opéré par Total et GDF Suez ;
- > **Pil-Ansu** : un projet de captage en postcombustion par antisublimation (givrage/dégivrage du CO₂) porté par le consortium EDF, GDF Suez, Alstom et Armines ;
- > **C2A2** : un projet de captage en postcombustion par solvant amine, porté par EDF et Alstom, en partenariat avec Veolia.

De plus, à la suite de la loi de finances rectificative de **2010**, dans le cadre des **investissements d'avenir**, le gouvernement français a confié la gestion de programmes qui incluent les thématiques **CSCV** :

- > **Démonstrateurs et plates-formes technologiques en énergies renouvelables, décarbonées et chimie verte**, gérés par l'**ADEME** (1,35 Md€) ;
- > **Instituts d'excellence sur les énergies décarbonées**, gérés par l'**ANR** (1 Md€).

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

- Le **Royaume-Uni** a lancé, **dès 2007, un premier appel d'offres pour la réalisation de démonstrateurs CSC**. L'objectif du gouvernement était de stimuler et de structurer la filière afin de positionner le pays en tant qu'acteur de premier plan. Cet appel d'offres a abouti à la sélection de **deux projets**, le premier à **Longannet** (Scottish Power) et le second à **Kingsnorth** (E.ON), dont a été financé l'étude d'ingénierie de base. Le gouvernement a annoncé avoir maintenu un budget de 1 Md£ pour le projet de Longannet, E.ON s'étant retiré. **Un second appel d'offres** (*A Framework for the development of clean coal*), lancé **fin 2009**, a permis de concevoir **un futur programme de quatre projets de démonstrateurs CSC**. Les projets pourront être réalisés pour le captage du CO₂ sur des centrales à charbon. L'un d'entre eux, au moins, devra capter le CO₂ d'une centrale à cycle combiné fonctionnant au gaz naturel.

7. Les pays en voie de développement

Différentes positions apparaissent :

- la **Chine** considère le CSC comme une technologie lui permettant non seulement d'atteindre ses objectifs de réduction des émissions de CO₂, mais également comme un moyen de développement économique et de diffusion des connaissances et du savoir technique du pays ;
- **l'Inde** a une position plus réservée, dans un contexte complexe de réduction des émissions de CO₂, et surtout dans l'attente de la validation économique et technique du CSC par les pays développés ;
- **l'Afrique du Sud** souhaite s'investir dans le développement du CSC pour réduire ses émissions de CO₂ dans l'attente de la mise en place d'un système énergétique fondé sur les énergies renouvelables et le nucléaire. Pour cela, le besoin de formation et de développement des compétences est indispensable.

Ainsi, une palette de politiques de soutien aux projets de grande taille s'ajoute à celles qui aident la R&D, pour participer au déploiement industriel et commercial du CSC. Ces politiques de soutien public varient d'un pays à l'autre en termes de :

- subventions nationales, comme aux Etats-Unis avec le DOE, ou en France et en Allemagne (auxquelles s'ajoute le financement européen) ;
- prêts conditionnés à l'utilisation de technologies nationales, comme au Japon, sur des projets se développant sur le territoire ou en dehors pour favoriser l'exportation ;
- appels d'offres gouvernementaux comme au Royaume-Uni.

Par ailleurs, le stockage du CO₂ via l'EOR, se développe plus particulièrement sur le territoire américain, les Etats-Unis s'impliquant beaucoup dans les technologies de précombustion.

Les coopérations internationales

La dimension internationale de la filière CSC s'explique, d'une part, par l'enjeu du réchauffement climatique, et, d'autre part, par sa proximité avec des secteurs industriels fortement mondialisés, en particulier celui de l'énergie. De plus, les centrales de production d'énergie à base de combustibles fossiles et les sites industriels, tels que les cimenteries ou aciéries susceptibles de faire l'objet de CSC, sont présents dans de nombreux pays. Il s'agit d'une filière émergente avec des barrières financières et sociétales importantes nécessitant de partager les efforts et les risques. Les coopérations internationales servent donc de **plate-forme de promotion permettant aux Etats impliqués de mettre en avant les compétences des acteurs nationaux** dans une logique de positionnement sur le futur marché mondial.

De nombreuses initiatives internationales ont ainsi vu le jour au cours des dernières années. La liste ci-dessous donne un premier aperçu d'initiatives européennes ou internationales. Elle permet d'identifier des **Etats fortement impliqués à l'international, tels que les Etats-Unis, le Royaume-Uni, l'Australie ou encore la Norvège** :

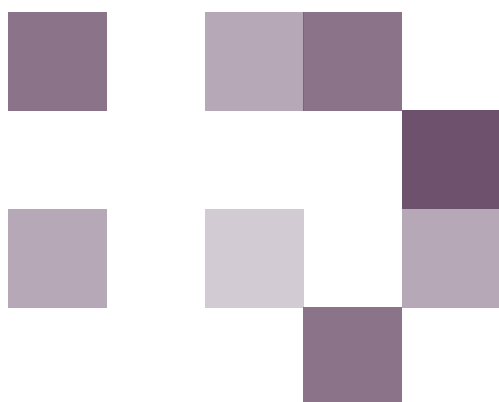
- ZEP : *European Technology Platform for Zero Emission Fossil Fuel Power Plants* ;
- EERA : *European Energy Research Alliance* ;
- CO2GeoNet : *European Network of Excellence on CO₂ geological storage* ;
- *European CCS Demonstration Project Network* ;
- AIE WPF : *Working Party on Fossil Fuels* ;
- *AIE Greenhouse Gas R&D Programme* ;
- *Biennial Regulatory Review* ;
- *AIE Clean Coal Centre* ;
- CSLF : *Carbon Sequestration Leadership Forum* ;
- GCCSI : *Global Carbon Capture & Storage Institute* ;
- *Berlin Forum – Sustainable Fossil Fuels Working Group* ;
- CCUS : *Carbon Capture Use & Storage Action Group*.

La France participe aujourd'hui à l'ensemble de ces initiatives. Cette implication est indispensable pour contribuer à la visibilité de la filière française à l'international et pour identifier des opportunités de marché. Cela permet de **suivre l'avancement de la filière à l'international**, de **présenter les activités françaises** devant un cercle élargi d'acteurs, de participer aux **travaux de rédaction de feuilles de route et d'établir un réseau de contacts**.

La filière valorisation du CO₂

Depuis les années 1980, de nombreux travaux de recherche ont étudiés les voies potentielles d'utilisation du CO₂ comme **matière première**. Le CO₂ peut soit être utilisé, sans transformation, dans des procédés industriels (remplacement de gaz réfrigérant, EOR), soit être transformé pour obtenir des produits chimiques ou à valeur énergétique. Le CO₂ pourra également être utilisé dans des procédés biologiques (algues, biocatalyse) pour la production de biocarburants ou de produits pharmaceutiques.

La **valorisation du CO₂** est une filière **au début de son développement**. Néanmoins, la communication de la communauté scientifique a fortement augmenté, à l'image du nombre de publications et de conférences internationales. Les pays les plus impliqués sont les **Etats-Unis** et le **Japon**, qui sont à l'initiative des projets pilotes les plus avancés (en particulier pour la production de carburants de synthèse). Les Etats-Unis encouragent fortement les recherches et le DOE a identifié la photoconversion et l'électroconversion du CO₂ et de l'eau comme un axe de recherche prioritaire. La **Chine** est également très active dans la recherche de voies catalytiques nouvelles et monte des partenariats avec des laboratoires américains, notamment pour accélérer le développement de technologies utilisant du gaz de synthèse. Ces trois grandes puissances industrielles profitent d'alliances internationales pour se positionner, dès à présent, sur ce marché émergent. En **Europe** et en **France**, plusieurs projets de recherche ont également démarré ces cinq dernières années, mais l'activité française est en retrait par rapport à d'autres pays, comme les Etats-Unis.



> 3. Les enjeux

Atteindre les objectifs du Grenelle de l'environnement à l'horizon 2020 et du facteur 4 à l'horizon 2050 permet de structurer le déploiement des technologies, les priorités de recherche, les besoins de démonstrateurs de recherche et les besoins de plates-formes technologiques et d'expérimentation.

En outre, 5 enjeux critiques devront être relevés, présentés ici sans ordre particulier :

1er enjeu : mettre en œuvre le CSC en France

Atteindre le facteur 4 en 2050 nécessite de commencer à mettre en œuvre le CSC en France dès 2020. Environ 75 Mt/an d'émissions de CO₂ dans les secteurs de la production d'électricité et des industries (sidérurgie, cimenterie, raffinerie) sont potentiellement concernées.

2e enjeu : maintenir la compétitivité des industries françaises

Malgré une production d'électricité fortement décarbonée et un marché local restreint, la France est aujourd'hui bien positionnée dans le domaine du CSC, à travers son secteur industriel et ses établissements publics de recherche et de formation. Les acteurs français sont présents tout au long de la chaîne de valeur, qui regroupe les activités de captage, de transport, de stockage et de valorisation du CO₂.

Le CSC en France pourrait concerner, dans un premier temps au moins, davantage les installations industrielles que les centrales électriques à combustibles fossiles. Le CSC est en effet critique pour beaucoup d'industries, comme le traitement et la valorisation des déchets, la sidérurgie, le raffinage ou encore la cimenterie, qui disposent de peu de solution pour réduire leurs émissions de CO₂. Des avancées peuvent être réalisées dans ces domaines et constituer un excellent vecteur d'exportation pour les acteurs français.

A moyen terme, avec le développement en France d'un parc de centrales à combustibles fossiles (notamment au gaz naturel), le secteur de la production d'électricité sera plus fortement concerné.

Pour nombre d'industriels français, l'enjeu est également de pouvoir maîtriser les technologies tant pour s'octroyer des parts de marché à l'export que pour les implanter dans leurs installations à l'étranger.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

3e enjeu : accentuer l'attractivité du territoire national

En réponse aux réglementations nationales et si l'environnement économique le permet, les industries françaises voient aussi dans le CSC une solution potentielle pour conforter ou maintenir leur activité sur le territoire national.

4e enjeu : garantir la sécurité de la chaîne, du captage jusqu'au stockage géologique

Afin de garantir la pérennité et la sécurité de la voie CSC, à court et long terme, l'enjeu principal est la capacité à anticiper et à gérer les risques accidentels et les impacts environnementaux et sanitaires éventuels associés à chaque maillon de la chaîne.

Pour le captage, les risques sont ceux des procédés industriels. En ce qui concerne le transport, les risques sont liés à l'état supercritique du CO₂ (en cas de rupture accidentelle de la canalisation, la vitesse de propagation de la rupture et la dispersion du CO₂ polyphasique sont encore mal connues). Quant aux risques de défaut de confinement du stockage géologique, ils sont spécifiques et pourraient affecter la population, les écosystèmes et les eaux souterraines. L'établissement de seuils ou de critères de sécurité et une bonne connaissance des impacts de l'ensemble de la chaîne seront des éléments déterminants pour le déploiement de la filière. Il faut développer des méthodologies et des modèles pour maîtriser non seulement les risques de nature accidentelle, mais également les risques sur le long terme, en étudiant à la fois l'évolution « normale » du stockage et aussi les possibles scénarios dits « d'évolution altérée ». De même, la définition précise de la responsabilité du site après fermeture est un facteur clé.

Il faudra considérer non seulement la fuite éventuelle ou la migration du CO₂ lui-même, mais également le rôle des substances annexes, qui peuvent être de trois sortes : d'une part, les composés injectés avec le CO₂ (par exemple, composés azotés ou soufrés, métaux, composés organiques à l'état de traces), d'autre part, les éléments traces potentiellement remobilisés dans le réservoir ou les couvertures à la suite des perturbations chimiques, et enfin, le cas échéant, les gaz natifs chassés par le CO₂ injecté (par exemple, du méthane ou de l'hydrogène sulfuré).

5e enjeu : valoriser le CO₂ en complément du CSC

En complément du stockage géologique du CO₂, une partie du CO₂ capté dans le cadre du CSC peut être valorisé, soit comme fluide, soit comme matière première pour fournir des produits à valeur ajoutée. Afin d'aller au-delà des valorisations actuelles de CO₂, il est primordial de corréliser la filière valorisation à la filière CSC, ce qui contribuerait également à améliorer la compétitivité de la filière.

> 4. Les paramètres clés

Construire des scénarios à long terme suppose d'identifier des paramètres clés, des variables dont on sait que l'évolution contrastée aboutira à des visions radicalement différentes du déploiement des technologies à l'horizon 2050. Sans prétendre être exhaustif, le groupe d'experts a mis en avant ceux qui seront de nature à infléchir significativement le déploiement de la filière.

- Les mesures incitatives et plus généralement la nature des politiques de régulation qui accompagneront le développement et le déploiement du CSC en France, en Europe et dans le monde ;
- La nature et l'ampleur des contraintes techniques et/ou sociétales pesant sur le déploiement du CSC.

La nature et l'intensité des politiques de régulation

Cela regroupe l'ensemble des mesures de politiques publiques qui devront/pourront être mises en œuvre pour accompagner le développement, l'expérimentation et le déploiement des technologies de CSC, des éléments aussi divers que :

- la mise en œuvre de normes et de contraintes réglementaires et/ou de mécanismes incitatifs pour soutenir dans la durée les filières jusqu'au déploiement en France, en Europe et à l'international (soutien de la R&D et de la démonstration, mise en place d'un coût explicite ou implicite du droit d'émettre du CO₂ à travers une taxe carbone ou des mécanismes de quotas) ;
- La définition des conditions de déploiement, d'exploitation et de maintenance des infrastructures de transport et de stockage sur du long terme. L'autorité en charge de cette mission aura notamment la responsabilité de la cohérence de l'infrastructure de collecte, de l'anticipation de la construction de gros pipelines et de la contractualisation avec les propriétaires actuels de pipelines afin de faciliter leur incorporation dans de plus grands réseaux. Deux cas de figure ont été pris en compte :
 - > L'Etat assure la charge de service public de déploiement, d'exploitation et de maintenance des infrastructures de transport ou de stockage,
 - > L'Etat définit une charte de service public pour le déploiement, l'exploitation et la maintenance des infrastructures de transport ou de stockage, cette mission étant confiée à des structures privées sous conditions de rémunération.

- La définition des règles de responsabilité à long terme, indispensables à une bonne gestion des sites de stockage (définition des responsabilités en cas de fuite, rôle et responsabilité de l'Etat – impossibilité de se retrouver avec des sites orphelins).

L'ensemble des experts, en France comme à l'étranger, s'accorde sur le fait que sans définition du rôle de l'Etat et sans régulation publique forte, notamment par le biais d'un prix minimum du CO₂, les conditions nécessaires au développement et au déploiement du CSC, comme option de réduction massive des émissions de CO₂, ne seront pas réunies.

La nature et l'ampleur des contraintes techniques et/ou sociétales

Le terme « contraintes » regroupe ici les paramètres, les questions, les défis et les incertitudes pouvant limiter l'exploitation du potentiel du CSC pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Les principaux défis concernent :

- la réduction de la dépense énergétique liée au captage et in fine la réduction du coût du captage,
- le retour d'expérience sur les installations industrielles,
- La validation des capacités de stockage à terre et en mer, ainsi que leur accessibilité,
- la maîtrise des risques environnementaux et sanitaires (compréhension des phénomènes, monitoring adapté),
- l'organisation d'un débat public sur les valeurs véhiculées par la technologie,
- les questions d'acceptation locale des projets.

Ces défis doivent être vus sous un angle dynamique dans la mesure où leur importance globale ou relative pourra évoluer dans le temps en fonction notamment des avancées de la recherche et de l'évolution des politiques climatiques régionales ou mondiales.

> 5. Les visions

Ces visions ont vocation à décrire, souvent de manière caricaturale, les différentes modalités de déploiement du CSCV. Elles **n'ont pas la prétention de décrire ce que sera la réalité à l'horizon 2050**, mais plutôt de définir le champ des possibles pour en déduire un ensemble de verrous, de priorités de recherche et de besoins de démonstrateurs, de plates-formes technologiques et d'expérimentations. La réalité, quant à elle, sera probablement une combinaison des **4 visions** établies dans cette feuille de route. Le groupe d'experts a par ailleurs choisi d'introduire une **vision à moyen terme (horizon 2020)**.

La vision 2020

Les **filères de valorisation du CO₂** se développent en parallèle du développement du captage, transport et stockage du CO₂, mais dans des proportions largement inférieures.

A l'horizon 2020, les **démonstrations industrielles du CSC** utilisent des technologies pour la plupart éprouvées à l'échelle de pilotes industriels. Elles permettent de tester l'intégration des différents maillons de la chaîne et de vérifier l'équation économique des différentes options de la filière. Les solutions de captage (postcombustion, oxycombustion, précombustion) ont atteint un stade de maturité permettant d'envisager une **première génération de centrales équipées de captage de CO₂**. Selon les prévisions de l'AIE, **entre cinquante et cent installations** seraient concernées sur les 1 000 qui devraient constituer le parc de centrales à l'horizon 2030 à travers le Monde. Les **procédés de captage de deuxième génération** sont testés sur des **démonstrateurs de recherche**.

Afin de bénéficier des retours d'expérience et d'accélérer l'effet de série, la communauté internationale s'organise **pour partager les connaissances** en respectant la protection de la propriété intellectuelle. Dans ce but et pour informer le public sur ces technologies, la **commission européenne** a d'ailleurs déjà mis en place un **réseau des démonstrateurs CSC**.

Au **niveau européen**, à la suite du plan de relance et du NER300, une **dizaine de démonstrateurs de taille industrielle sont opérationnels depuis plusieurs années**.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

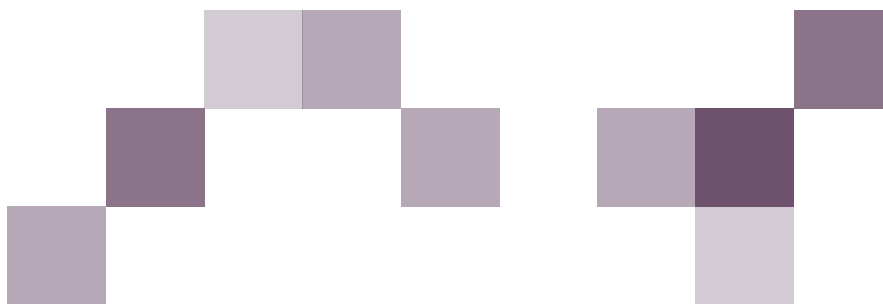
Pour atteindre le facteur 4 en 2050, la **France** s'organise (intervention de l'Etat, structuration des acteurs, démonstration de la technologie...) pour faciliter la mise en œuvre, dès 2020, du captage, transport et stockage géologique du CO₂ :

- la **technologie**, déjà étudiée dans le secteur de la production d'électricité, est **en cours de démonstration**, notamment dans la **sidérurgie** avec la technologie TGR-BF étudiée par ArcelorMittal.
- les **cycles combinés gaz** prennent le relais des centrales thermiques de production d'électricité à partir de charbon, pour répondre aux besoins de semi-base et de pointe saisonnière (*encadré ci-dessous*). Des technologies de captage spécifiques aux installations de combustion au gaz sont testées à l'échelle de démonstrateurs de recherche.

Pointe, base et semi-base

Les équipements qui fonctionnent de manière à peu près constante au cours de la journée ou au cours de l'année (appareils de froid, équipements industriels utilisés en continu) définissent la consommation électrique de **base**. D'autres équipements (ampoules électriques, certains radiateurs, climatiseurs) ne fonctionnent que sur des plages de temps réduites dans l'année ou dans la journée : c'est la consommation de **pointe**. D'autres enfin sont à mi-chemin, fonctionnant par exemple seulement l'hiver, mais avec une consommation « lissée » sur la journée : c'est la consommation de **semi-base**.

- le captage du CO₂ (et son stockage géologique) est aussi appliqué aux installations utilisant de la biomasse et aux sources de CO₂ issues de procédés de fermentation (papeterie, production d'énergie, production de biocarburants, etc...) : il s'agit du **BioCSC**. Cela peut mener à un bilan négatif d'émissions de CO₂, en fonction du pourcentage de biomasse impliqué (dans les installations de combustion, le combustible est rarement à hauteur de 100 % biomasse). Le **BioCSC** doit également être envisagé en tenant compte des problématiques telles que l'affectation des sols (à usage alimentaire ou énergétique) ou la sélection de la biomasse selon son bilan carbone. Un mécanisme incitatif adapté doit être mis au point, les biocombustibles (bois, biomasse...) et le CO₂ issu de procédés de fermentation bénéficiant aujourd'hui, par convention, d'un facteur CO₂ nul dans le cadre du système européen d'échange de quotas.
- la mise en œuvre du CSC est **favorisée dans les bassins industriels** (Dunkerque, le Béarn, Le Havre, La Lorraine, Fos-sur-Mer) qui rassemblent de nombreux secteurs d'activités émetteurs en CO₂ et d'éventuels utilisateurs de CO₂. La valorisation contribue alors à baisser les coûts à l'échelle du site industriel.
- en complément des voies de **valorisation du CO₂** déjà industrialisées, **certaines voies** (hydrogénation, microalgues...) **arrivent à maturité commerciale**.
- les **cadres réglementaire et financier** (mise en place et gestion des infrastructures, responsabilité à long terme des sites, caractère incitatif...) sont **clarifiés** pour inciter à un déploiement rapide.
- les **retours d'expérience** sur les premiers démonstrateurs font l'objet d'échanges dans les communautés scientifiques et industrielles.



Les visions 2050

Le croisement des 2 paramètres clés identifiés dans cette feuille de route permet d'aboutir à 4 visions contrastées du déploiement des technologies de CSCV à l'horizon 2050.

Visions 2050

	Fortes contraintes techniques et/ou sociétales	Faibles contraintes techniques et/ou sociétales
Mesures incitatives et réglementaires faibles	Vision 1 : déploiement marginal du CSC	Vision 2 : CSC réservé à quelques gros émetteurs et secteurs industriels ne pouvant appliquer des mesures alternatives de réduction des émissions de CO ₂
Mesures incitatives et réglementaires fortes	Vision 3 : forte mutualisation et stockage géologique du CO ₂ en mer privilégié	Vision 4 : déploiement du CSC à grande échelle à terre et en mer

Déploiement marginal du CSC

Hypothèses

L'absence de mesures incitatives, associée à des blocages sociétaux nationaux ou locaux et à des verrous technologiques ou économiques, conduit à un déploiement marginal du CSC.

Conséquences

Les barrières au développement de la filière restent élevées, les projets restent en petit nombre, avec un faible relais industriel. Les secteurs industriels, qui ne peuvent faire appel à d'autres technologies de réduction des émissions de CO₂, ont recours à l'achat de quotas ou de crédits dont le prix est élevé. Les technologies de captage du CO₂ déployées sont donc spécifiques à chacune des filières qui a mutualisé le financement de sa propre recherche et de ses opérations de démonstration. De plus, les contraintes sociétales limitent le développement du transport et du stockage géologique.

Les projets se concentrent là où les activités industrielles sont en croissance et dans des zones géographiques qui favorisent le CSC grâce à :

- un contexte de régulation incitatif,
- des coûts de mise en œuvre réduits,
- une situation géographique favorable au stockage.

Dans ce contexte, la valorisation du CO₂ est favorisée, mais pour des quantités limitées de CO₂, faibles au regard des objectifs du facteur 4. La compétitivité de la filière est néanmoins améliorée.

Cette vision est associée à une offre de formation faible qui ne permet pas d'essaimer des ingénieurs et des techniciens à l'international.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

CSC réservé à quelques gros émetteurs et secteurs industriels

Hypothèses

Les mesures incitatives et réglementaires sont faibles : l'Etat n'intervient pas pour inciter au déploiement de la filière CSC, il n'y a **pas de notion de service public**. Les **principaux opérateurs** dans les domaines du transport et du stockage du CO₂ sont **issus du secteur privé**.

Les contraintes techniques et/ou sociétales sont néanmoins plus modérées que dans la vision 1. Une **gestion concertée des projets de stockage** (tant à terre qu'en mer) est mise en œuvre au niveau local. Cette vision suppose une **maîtrise des contraintes techniques** listées ci-dessous (cf. Section 6).

Conséquences

Le déploiement du CSC repose uniquement sur les acteurs privés des secteurs fortement émetteurs et/ou pour lesquels les autres solutions de réduction des émissions de GES (efficacité énergétique, énergies renouvelables...) ne sont pas suffisantes (cas de la sidérurgie, de la cimenterie). Les coûts de mise en œuvre de la technologie et la responsabilité des infrastructures et des sites de stockage sont supportés par les opérateurs privés, mais la responsabilité des stockages est transférée à l'Etat à la fin de la période d'exploitation et de surveillance (période définie selon la directive européenne sur le stockage géologique du CO₂). Le **déploiement de la filière CSCV** reste **parcellaire**.

Les effets d'échelle et d'apprentissage sont limités, les coûts des technologies baissent peu, tout comme les émissions de CO₂, loin de répondre aux objectifs nationaux et internationaux. De même, les possibilités de mutualisation des différents maillons de la filière sont restreintes : la mise en commun des infrastructures de transport et des sites de stockage entre différents acteurs ne peut se faire que localement, par exemple, à l'échelle d'une zone industrielle.

Malgré la levée des verrous techniques et localement des verrous sociétaux, le **CSC reste une option relativement coûteuse de réduction des émissions de GES**. La **valorisation du CO₂** contribue néanmoins à baisser les coûts à l'échelle des sites industriels où elle est pertinente, comme les industries pétrolières, où la récupération des hydrocarbures permet un retour sur investissement.

L'**offre de formation** aux ingénieurs et techniciens est limitée à **quelques filières industrielles**. Elle n'est pas reconnue à l'échelle internationale.

Forte mutualisation et stockage géologique du CO₂ en mer privilégié

Hypothèses

Les **pouvoirs publics** jouent un **rôle central** dans le déploiement de la technologie CSC. Des systèmes incitatifs (taxe, quotas...) sont mis en place. Néanmoins, de **fortes contraintes techniques et/ou sociétales freinent le déploiement du CSC à grande échelle** (blocages internationaux pour un accord global sur le climat empêchant le déploiement mondial du CSC, blocages nationaux ou locaux, impasses techniques).

Conséquences

Les contraintes techniques et économiques poussent vers la **mutualisation des sites de stockage** entre différents opérateurs. Cela permet de limiter les problèmes de capacité réelle des sites de stockage, et de réduire les risques financiers liés aux conséquences d'une impossibilité d'injecter les quantités prévues.

Les contraintes sociologiques bloquent le développement du stockage géologique à terre, ce qui a pour conséquence de **privilégier le stockage en mer**, sous réserve de maîtriser les conflits d'usage et les coûts.

Cette vision se traduit par :

- une **prédominance** en Europe des pays de l'**Europe du Nord et de l'Ouest dans la filière stockage**. Les difficultés de déploiement en Europe de l'Est sont contournées par des accords politiques leur garantissant l'accès aux sites de stockage en mer. En France métropolitaine, l'exploitation des sites de stockage est limitée aux besoins de R&D ;
- une **augmentation** de la **taille des stockages en mer** ;
- une augmentation des coûts d'exploitation du stockage (forage, injection, monitoring) du fait de l'hostilité du milieu (mer) ;
- des **activités de stockage pilotées par l'industrie pétrolière et gazière**, leur permettant ainsi de compenser la fin de leurs activités de production en Mer du Nord ;
- une augmentation du coût du transport engendre des efforts sur ce maillon. Le partage des investissements entre les acteurs devient un facteur clé. L'accès à des tiers au réseau de transport et aux sites de stockage sous condition de compensation est possible, à condition de respecter des règles strictes sur les spécifications du CO₂. Cette **mutualisation** incite également à la naissance (ou au renforcement) de **grandes compagnies spécialisées, publiques ou privées, gérant les réseaux de transport et/ou les sites de stockage**. Un organe de régulation (type Commission de régulation de l'énergie) pourrait être créé ;
- une orientation prioritaire du **monitoring à des fins environnementales et sociétales** ;
- un déploiement local d'**autres solutions que le CSC** pour limiter les émissions de CO₂ (efficacité énergétique, nouveaux procédés de production, valorisation du CO₂...);
- **peu de projets intégrés** compte tenu de la forte mutualisation. La chaîne est découpée en 3 maillons (captage, transport mutualisé, stockage mutualisé) avec, le cas échéant, des acteurs différents selon les maillons et des acteurs centralisés pour le transport et le stockage.

L'**offre de formation** et de recherche se concentre essentiellement sur le **captage et le transport**.

Déploiement du CSC à grande échelle à terre et en mer

Hypothèses

La **notion de service public** est **centrale** dans le déploiement de la technologie CSC. Le transport et le stockage sont assurés par des opérateurs privés ou publics réglementés (l'exploitation et la maintenance des infrastructures de transport et des sites de stockage sont similaires au régime mis en place pour le transport ferroviaire, les télécoms ou le réseau électrique ou gazier). Des systèmes incitatifs (taxe, quotas...) sont mis en place.

Les contraintes techniques et/ou sociétales sont modérées. Les **capacités de stockage** sont **validées** et les **impacts environnementaux et sanitaires maîtrisés** sur toute la filière. Une **gestion concertée des projets de stockage** (tant à terre qu'en mer) est mise en œuvre au niveau local.

Conséquences

Le **CSC** se déploie progressivement à **grande échelle**, en parallèle à **terre et en mer**.

Les effets d'échelle et d'apprentissage permettent d'aboutir aux **coûts les plus bas** sauf en cas de sous-capacité des fournisseurs de technologies.

La **valorisation du CO₂** est donc, en terme de volume de CO₂ considéré, mise en œuvre de façon **marginale**.

En termes d'infrastructure, cette vision se traduit par :

- la création en **Europe** de **hubs¹⁶ de stockage à terre**, des réseaux de stockage entre la Pologne, l'Allemagne, l'Espagne et la France. Ils permettent d'exploiter les ressources en charbon d'Allemagne de l'Est et de Pologne, assurant une plus grande indépendance énergétique de l'Union européenne ;
- la création dans le reste du **monde** de **hubs de stockage à terre et en mer** sur la base d'une cartographie de réseaux régionaux de sources multiples de CO₂ ;
- le **monitoring à vocation sécuritaire et préventive** sur de longues périodes. Ce surcoût de monitoring à terre est néanmoins compensé par les plus faibles coûts de développement des infrastructures de stockage à terre par rapport au stockage en mer. Les processus de concertation permettent sans doute un accord sur le type de monitoring à mettre en place ;
- une **densification des réseaux de transport** à long terme. Les coûts de transport et de stockage sont moindres et la filière se développe de façon plus homogène au niveau mondial. Il est donc plus facile de donner un prix élevé au CO₂.

16 - Le terme hub désigne un concept commercial développé par les compagnies aériennes américaines : c'est leur base opératoire (plate-forme de correspondance, site principal de maintenance). Par extension, il est utilisé dans d'autres domaines comme les réseaux de télécommunications ou ici de transport et de stockage de CO₂.

Du fait du déploiement géographique assez généralisé, **des sociétés de service peuvent se développer** aux côtés des opérateurs principaux, proposant aux industriels émetteurs un transport, un stockage, ou une solution clés en main (chaîne intégrée).

Les **grands opérateurs** (publics ou privés) du CSC et les sociétés de service peuvent **exporter leur savoir-faire**, d'abord en Europe puis sur d'autres continents.

Cette vision suppose une **offre de formation importante** pour assurer le déploiement d'une filière hautement technologique.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

> 6. Les verrous

Les visions 2020 et 2050 permettent d'identifier les verrous technologiques, économiques, organisationnels et transversaux, d'une part, pour la filière CSC, d'autre part, pour la valorisation du CO₂.

Les verrous du CSC

A l'horizon 2020

Ils semblent s'articuler autour :

- **du coût du captage du CO₂**. L'enjeu principal est de réduire les coûts de la technologie sur les volets investissement et fonctionnement (y compris en mobilisant des mécanismes incitatifs ou par des politiques internationales). Les coûts opératoires sont principalement impactés par la dépense énergétique des procédés de captage ;
- **de la flexibilité des procédés de captage**. Ils devront s'adapter, par exemple, au régime transitoire de la centrale électrique et éventuellement à des durées d'utilisation plus faibles ;
- **de la faisabilité technique du stockage de CO₂**, qui devra être démontrée selon les axes suivants :
 - > capacité réelle de stockage et intégrité du réservoir ;
 - > localisation (à terre ou en mer, profondeur, caractéristiques du réservoir et de la couverture...) ;
 - > injectivité et intégrité des puits ;
 - > phénomènes liés au stockage, principalement sur les aquifères, tels que la gestion de l'eau salée, une nouvelle problématique liée au contrôle de la pression de stockage qui pourrait nécessiter d'extraire de l'eau salée ;
 - > validation des outils de monitoring et de surveillance pour le court et le long terme.
- **des impacts environnementaux et sanitaires** de toute la chaîne (captage, transport, injection, stockage) ;
- **de la prise en compte de la faisabilité sociale**¹⁷. Les retours d'expérience des premiers projets démonstrateurs de captage et de stockage du CO₂ à travers le monde placent cette question au cœur des préoccupations des porteurs de projet, et en font une condition centrale du développement de la filière. Le développement de ces technologies soulève des enjeux :
 - > aux niveaux national et international, en matière d'information de la population, qui connaît assez peu ces technologies, et de débat de valeurs,
 - > au niveau local, avec la nécessité de modalités efficaces de médiation et d'information sur les impacts et les risques associés aux projets. Cela implique une gestion des projets avec les populations concernées.

17 - La notion de **faisabilité sociale** a été élaborée sur le même principe que la faisabilité technique. Etudier la faisabilité technique d'un projet, c'est accepter que tout n'est pas faisable techniquement, qu'il existe des limites physiques et naturelles aux projets. De la même manière, la notion de faisabilité sociale insiste sur le fait que tout n'est pas faisable socialement, qu'il existe des intérêts et des débats de valeurs qui peuvent être irréconciliables au sein de la société.

- **des mécanismes réglementaires** qui pourraient aller au-delà du cadre minimum imposé par la directive sur le stockage de CO₂ et ainsi accélérer le déploiement du CSC ;
- **de l'implication de la France (« lobbying »)** dans la mise en place de réglementations européennes et internationales ;
- **de l'incorporation du CSC dans des dispositifs** de type mécanisme **de développement propre** (MDP ou CDM en anglais pour *Clean Development Mechanism*¹⁸) ;
- **de l'intégration dans l'ETS** des émissions évitées par captage de CO₂ sur des installations de combustion de **biomasse** ou la mise en place de tout autre système permettant d'en tenir compte ;
- **de la mise en place d'une architecture financière compatible avec les spécificités de la filière**, permettant d'encourager les acteurs privés à investir dans ces technologies. Les coûts d'investissement pour le CSC, comme pour les énergies alternatives, sont élevés. Dans des marchés énergétiques dont la tendance est à la libéralisation et à des horizons réduits de rentabilité des investissements, les pouvoirs publics ont un rôle majeur à jouer en créant un cadre de régulation propice au déploiement de la filière (caractère incitatif, aide aux démonstrateurs, à la valorisation...).

A l'horizon 2050

Sur la période 2020-2050, d'autres verrous complètent les précédents. Ils devront être levés pour que les visions les plus ambitieuses de cette feuille de route puissent se réaliser. Ils concernent :

- **la construction d'une infrastructure de transport** (localisation, coût), enjeu majeur ; la distance entre le captage et le stockage sera déterminante en termes de coûts ;
- **l'incertitude sur le prix des quotas d'émissions du CO₂ à long terme**. Au-delà des mécanismes incitatifs, il est indispensable d'avoir un marché avec un prix significatif du quota CO₂ ;
- **la compétition pour l'accès aux sites de stockage de CO₂** (faible capacité de stockage, limitation de capacité pour éviter les conflits).

18 - Principal dispositif du protocole de Kyoto, le mécanisme de développement propre incite des entreprises du Nord à financer la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les pays du Sud, en échange de crédits carbone qui leur permettent de compenser leurs propres émissions.

Les verrous de la valorisation du CO₂

A l'horizon 2020

Ils semblent s'articuler autour¹⁹ :

- **de la validation des démonstrateurs de captage** afin de disposer, à terme, de CO₂ en quantité suffisante ;
- **du mode et du coût de l'énergie nécessaire pour casser la molécule de CO₂**. L'énergie peut être apportée sous forme d'électricité, de chaleur ou de rayonnement lumineux ;
- **de la production d'hydrogène vert ou décarboné à bas coût** ;
- **du niveau de pureté du CO₂** issu des fumées de combustion, l'utilisation de CO₂ contenant des impuretés (composés soufrés, poussières, oxygène, métaux lourds) pouvant perturber le fonctionnement des catalyseurs et impacter la qualité des produits ;
- **de la conformité des produits synthétisés**. Par exemple, les ciments produits par minéralisation doivent répondre aux mêmes performances (propriétés, qualité...) que les ciments classiques. De même, les propriétés des molécules chimiques (polycarbonates, autres polymères...) produites à partir de CO₂ doivent égaler celles des molécules synthétisées par voie classique ;
- **de la prise en compte dans l'ETS** des émissions évitées par la valorisation du CO₂, ou de tout autre mécanisme incitatif ayant des effets comparables ;
- **de la validation des analyses de cycle de vie et bilans carbone**, en fonction de la nature du produit (produit de substitution ou produit nouveau), de la durée de stockage, l'un des objectifs de la valorisation du CO₂ étant la diminution des émissions de CO₂ sur le long terme.

A l'horizon 2050

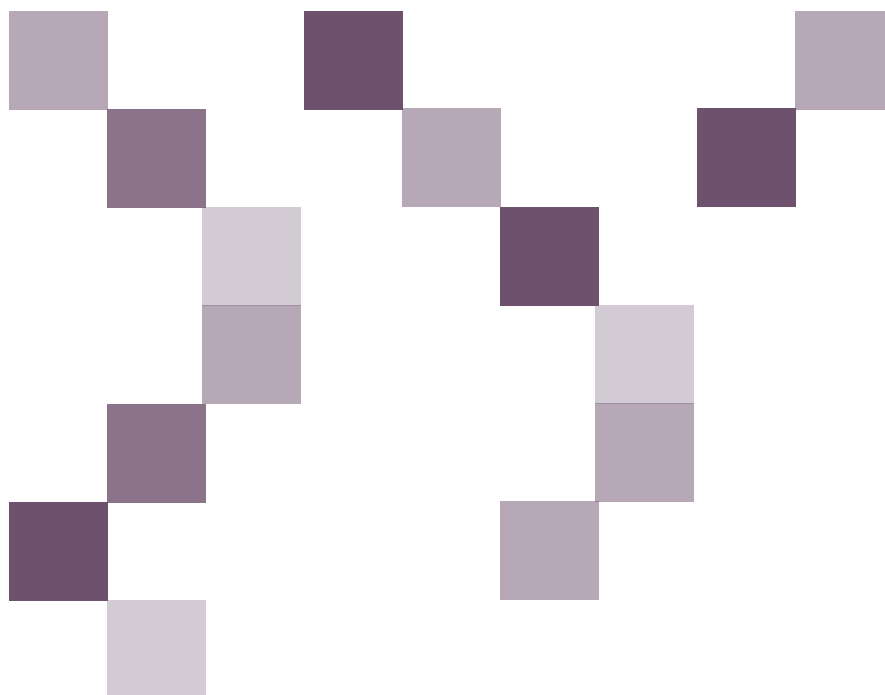
Sur la période 2020-2050, d'autres verrous viennent compléter les précédents¹⁹, qui, à cet horizon, devraient être levés. Ils concernent :

- **la capacité à concevoir à terme des quantités de produits commercialisables**. Le principal verrou repose alors sur la compréhension fondamentale des réactions en jeu (chimiques, biologiques) ;
- **la présence d'un marché du CO₂ avec un prix significatif** ;
- **la production massive d'énergie décarbonée et non carbonée**, car pour donner un sens environnemental à la valorisation du CO₂, l'énergie nécessaire pour casser la molécule de CO₂ ne doit pas émettre de CO₂ lors de sa production.

19 - « Panorama des voies de valorisation du CO₂ », étude ADEME, juin 2010.

> 7. Les priorités de recherche

En cohérence avec les verrous préalablement identifiés, le tableau ci-dessous présente les axes de recherche jugés prioritaires par les experts ainsi que les objectifs de validation (source : ZEP, experts de la feuille de route). Concernant ces derniers, on suppose qu'à l'échéance indiquée, la technologie est démontrée sur la base des objectifs mentionnés et prête à être déployée. Le recensement des projets de recherche financés par l'ADEME ou l'ANR permet de mettre en évidence les sujets qui ont commencé à être traités au niveau national, mais également les lacunes.



Captage du CO₂

Postcombustion

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
L'optimisation énergétique des systèmes de captage				
• perte de rendement dû au captage	10 points de rendement	< 10 points de rendement	< 5 points de rendement	
• niveau d'énergie de régénération des solvants liquides	< 3 GJ/tonne de CO ₂	< 2 GJ/tonne de CO ₂	< 1,5 GJ/tonne de CO ₂	
L'optimisation et le développement de nouveaux procédés de captage (systèmes d'absorption, d'adsorption, membranaires, cryogéniques, à base d'hydrates) : • contacteurs plus efficaces (réduction de la taille des équipements) • sensibilité aux impuretés minimisée. voire cocaptage CO ₂ /impuretés • ...	1 ^{re} génération ²⁰	2 ^e génération ²¹	3 ^e génération ²²	ANR Gascogne : garnissage structuré en composite carbone/carbone pour le captage du CO ₂ par lavage aux amines ANR ACACIA 31 : développement d'un nouveau procédé de captage du CO ₂ par adsorption sur solide ANR CapCO2 : adsorption sur phase minérale ANR NoMAC : nouveaux matériaux d'adsorption pour le captage du CO ₂ ANR CICADI : contacteur innovant pour le captage du CO ₂ ANR MECAFI : procédés membranaires pour la capture du CO ₂ des fumées d'incinération ADEME Antisublimation : captage par antisublimation et cocaptage de polluants ANR CO2 Sublim : captage par antisublimation de fumées enrichies en CO ₂ ANR SECOHYA : captage du CO ₂ par hydrate de gaz
La recirculation des fumées sur les turbines à gaz pour optimiser le captage sur centrales à cycle combiné (combustion avec recirculation des fumées)	Procédé optimisé pour augmenter le contenu en CO ₂	Turbine à gaz fonctionnant avec recirculation des fumées (combustion stable et complète)		ADEME CLOE : étude technico-économique du recyclage des fumées émises par la turbine à gaz
L'intégration énergétique des systèmes de captage dans le schéma global de la production d'énergie :				ANR CAPCO2 : étude d'intégration pour 4 types d'émetteurs (four de cimenterie, haut-fourneau, centrales thermiques gaz et charbon) ADEME éCO2 : étude d'intégration énergétique pour deux systèmes de production d'énergie à partir de charbon (postcombustion (amines) et oxycombustion)
• optimisation du cycle vapeur		Cycle vapeur optimisé pour limiter la pénalité énergétique		
• efficacité énergétique du traitement des fumées		Efficacité énergétique du traitement des fumées optimisée		
L'efficacité énergétique de la compression du CO₂				
• captage par solvant amines (la compression représente 31% de la pénalité énergétique globale liée au captage)	85 kWh/t CO ₂	< 85 kWh/t CO ₂	82 kWh/t CO ₂	
• captage par ammoniac refroidi	33 kWh/t CO ₂	< 33 kWh/t CO ₂	30 kWh/t CO ₂	

20 - Les technologies de 1^{re} génération correspondent aux procédés de captage actuellement disponibles pour une démonstration de taille industrielle.

21 - Les technologies de 2^e génération représentent des améliorations des technologies existantes (ex : amélioration des procédés à base de solvants) ou des technologies actuellement au stade de pilote.

22 - Les technologies de 3^e génération sont actuellement au stade de la recherche.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Oxycombustion

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
L'optimisation énergétique des unités de séparation d'air²³ : <ul style="list-style-type: none"> distillation cryogénique avancée séparation par membranes ou adsorbants 	140 ²⁴ – 170 ²⁵ kWh/tonne O ₂	120 ²⁴ – 150 ²⁵ kWh/tonne O ₂	90 ²⁴ – 120 ²⁵ kWh/tonne O ₂	ANR OXYBAC : production d'oxygène à basse consommation d'énergie dédiée à l'oxycombustion
Combustion à l'oxygène et recirculation des fumées en chaudière : <ul style="list-style-type: none"> combustion transfert de chaleur corrosion et encrassement contrôle des polluants ... 		Combustion sous pression (CO ₂ sous pression) Combustion en présence d'une concentration élevée d'O ₂		ADEME OXYFUEL : oxycombustion avec recirculation des fumées sur chaudière ANR TACoMA : oxycombustion avec recirculation des fumées ADEME OXYCOMB : maîtrise des risques sur chaudière oxycombustion avec recyclage des fumées
Combustion à l'oxygène et recirculation des fumées en turbine à gaz : <ul style="list-style-type: none"> combustion transfert de chaleur design du cycle vapeur ... 		Turbine à gaz fonctionnant en présence d'oxygène et recirculation des fumées Combustion sans flamme		
Procédés intégrés (boucle chimique, réacteur membranaire) : <ul style="list-style-type: none"> Mise au point de matériaux pour la fourniture d'oxygène Développement de réacteurs pour une conversion efficace du combustible 		Boucle chimique	Réacteur membranaire	ANR CLC-MAT : matériaux pour le procédé de « Chemical Looping Combustion » ADEME Chemical looping : amélioration du procédé d'oxycombustion par boucle chimique sur centrales charbon
L'intégration énergétique des systèmes de captage dans le schéma global de la production d'énergie.		Cycle vapeur optimisé (récupération de chaleur sur la compression)		ADEME éCO2 : étude d'intégration énergétique pour deux systèmes de production d'énergie à partir de charbon (postcombustion (amines) et oxycombustion)
L'efficacité énergétique de la compression du CO₂ (la compression représente 38% de la pénalité énergétique globale liée au captage)	101 kWh/t CO ₂	<101 kWh/t CO ₂		

23 - Dans les conditions ISO : 1 bar, 15 °C, 60 % d'humidité, O₂ à pression atmosphérique. Pour de l'O₂ à 140 kPa (kilopascal), on ajoute 10 kWh/tonne.

24 - Avec intégration thermique de l'ASU

25 - Sans intégration thermique de l'ASU

Précombustion

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
L'optimisation énergétique des unités de séparation d'air²⁶ : <ul style="list-style-type: none"> • distillation cryogénique avancée • séparation par membranes ou adsorbants 	250-310 kWh/tonne O ₂ (avec intégration de l'azote)	210-270 kWh/tonne O ₂ (avec intégration de l'azote)		
Gazéification/Reformage	Changement d'échelle atteint : gazéifieur de grande taille (1200-1500 MWth)			
Procédés de séparation du CO₂	Solvant physique	Séparation cryogénique	Séparation à base d'hydrates Séparation dans réacteur membranaire	
Le développement de turbines à hydrogène : <ul style="list-style-type: none"> • maîtrise de la combustion • brûleur bas-NOx • matériaux haute température • ... 	Turbine H ₂	Turbine H ₂ de haute efficacité et faible émission d'oxydes d'azote		
L'intégration énergétique des systèmes de captage dans le schéma global de la production d'énergie afin de minimiser le poids de la consommation énergétique des auxiliaires.	Intégration des différentes unités (unité de séparation d'air, conversion CO, séparation CO ₂) avec le système IGCC			
L'efficacité énergétique de la compression du CO₂	20-30 kWh/t CO ₂			

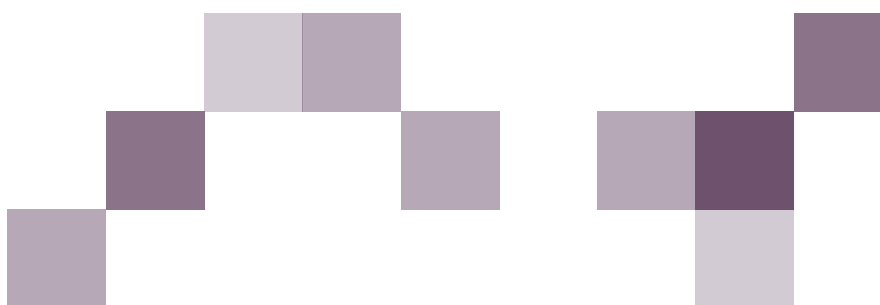
26 - Dans les conditions ISO : 1 bar, 15 °C, 60 % d'humidité.

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Systèmes de captage spécifiques ou adaptés pour les procédés industriels fortement émetteurs

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Systèmes de captage pour le secteur sidérurgique	Séparation du CO ₂ intégré au procédé de production de fonte (ex : ULCOS-BF)	Démonstrateurs de séparation sur procédés de fusion réduction (Hisarna) et de réduction directe (ULCORED)	Déploiement de ces technologies ; mutualisation des réseaux de transport et des sites de stockage ; transport transfrontalier de CO ₂	ANR IMCAT : adsorbants optimisés pour le captage du CO ₂ des gaz de hauts-fourneaux
Systèmes de captage pour le secteur cimentier <ul style="list-style-type: none"> intégration de la séparation du CO₂ en amont dans le procédé cimentier mutualisation de la collecte de CO₂ 	Séparation du CO ₂ intégrée	Logistique autour des réseaux (raccordement, mélange de flux, variations de production...) <i>en lien avec la problématique réseaux (VII B.3)</i>	Mutualisation <i>en lien avec la problématique réseaux (p.30)</i>	ADEME Carbonatation : captage par cycle calcium dans un contexte cimentier ADEME CARGESE : captage du CO ₂ par adsorbants calciques ANR ACACIA 31 : développement d'un nouveau procédé de captage du CO ₂ par adsorption sur solide ANR CAPCO2 : adsorption sur phase minérale



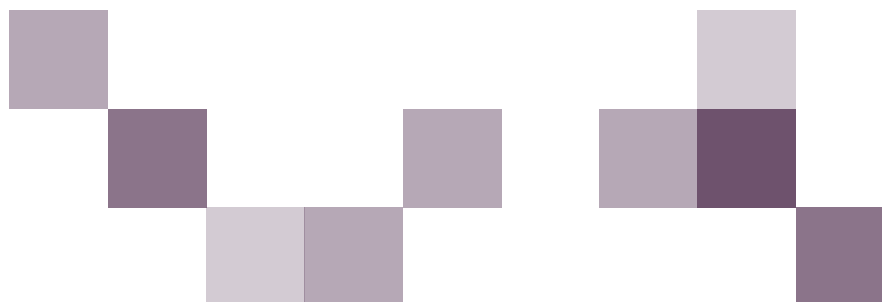
Transversal

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
<p>L'amélioration de l'efficacité énergétique des centrales électriques (conditions ISO, rendements sans CSC) :</p> <ul style="list-style-type: none"> matériaux haute température mise en œuvre des matériaux 	<p>> 46 % (PCI) pour une centrale au charbon pulvérisé</p> <p>> 60 % (PCI) pour un cycle combiné gaz naturel</p>	<p>> 48 % (PCI) pour une centrale au charbon pulvérisé</p> <p>> 62 % (PCI) pour un cycle combiné gaz naturel</p>	<p>> 50 % (PCI) pour une centrale au charbon pulvérisé</p> <p>> 65 % (PCI) pour un cycle combiné gaz naturel</p>	
<p>L'adaptation des procédés de captage à la variation de charge de la centrale électrique (flexibilité)</p>	Fonctionnement en base	Fonctionnement en base et en semi-base		
<p>Les impacts environnementaux et sanitaires du captage de CO₂</p> <ul style="list-style-type: none"> émissions atmosphériques consommation d'eau traitement des effluents liquides et solides 	Acquisition de connaissances sur les impacts environnementaux et sanitaires et leur maîtrise	Démonstration de l'absence d'impacts par le retour d'expérience sur des sites démonstrateurs		
<p>Conditionnement du CO₂</p> <ul style="list-style-type: none"> purification déshydratation 	Procédés de traitement des fumées adaptés aux spécificités de la filière de captage du CO ₂			

Transport du CO₂

Canalisations

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Infrastructure de transport	Standards adaptés aux différentes conditions de transport par canalisations			
Matériaux	Tenue des matériaux des canalisations en présence d'impuretés provenant de divers procédés (centrales électriques, procédés industriels, procédés de captage)			ADEME Transport CO2 : état de l'art sur le rôle des impuretés, corrosion et sécurité du transport
Thermodynamique des fluides denses	Maîtrise des écoulements polyphasiques, acquisition des données thermodynamiques des fluides complexes			ADEME Transport CO2 : état de l'art sur la thermodynamique du CO ₂ ANR TRANSCO2 : thermodynamique des mélanges CO ₂ + impuretés
Sécurité/surveillance <ul style="list-style-type: none"> méthode de détection des fuites modélisation de la dispersion dans l'atmosphère 	Modèle de dispersion dans l'atmosphère Développement de techniques de détection de fuites	Amélioration des modèles et des technologies grâce au retour d'expérience		



Bateaux

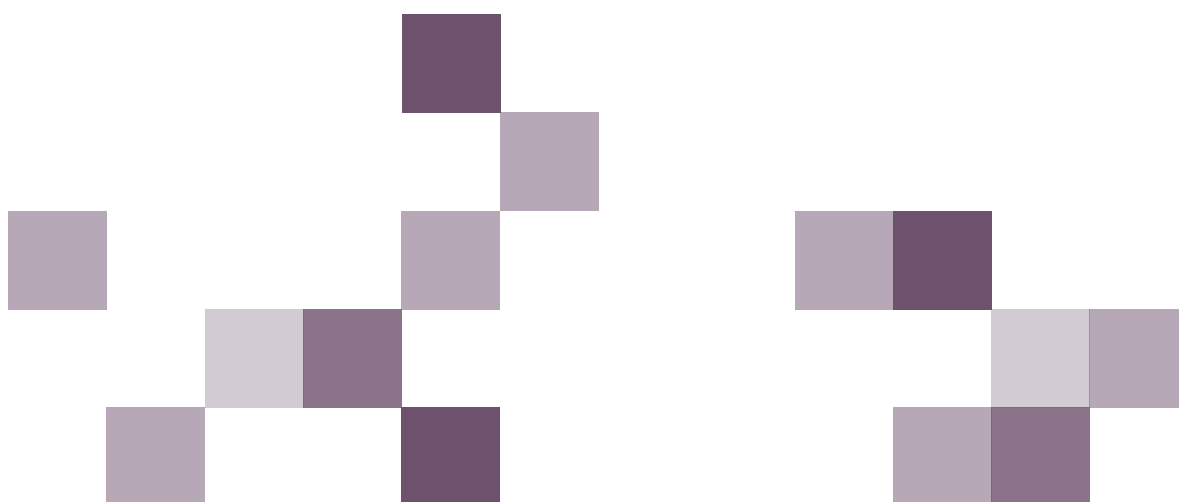
Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Infrastructure de transport		Standards adaptés aux différentes conditions de transport par bateaux		ANR TRANSCO2 : étude sur le transport maritime de CO ₂
Matériaux		Tenue des matériaux des réservoirs des bateaux en présence d'impuretés provenant des divers procédés (centrales électriques, procédés industriels, procédés de captage)		ADEME Transport CO2 : état de l'art sur le rôle des impuretés, corrosion et sécurité du transport

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Réseaux

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Economie des réseaux	Modélisation socio-économique du transport			
Infrastructure de transport	Atlas français de l'infrastructure de transport. Cet atlas sera également destiné à alimenter un atlas européen.	Logistique autour des réseaux (raccordement, mélange de flux, variation de production...)	Mutualisation	



Stockage du CO₂

Caractérisation des sites de stockage

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Evaluation des capacités de stockage de CO₂	Méthodologie standardisée (v1)	Mise à jour grâce au retour d'expérience (v2)	Méthodologie (v3)	ANR Géocarbone PICOREF : pilote pour l'injection de CO ₂ dans les réservoirs géologiques en France ANR Géocarbone PICOREF : pilote pour l'injection de CO ₂ dans les réservoirs géologiques en France ADEME METSTOR : cartographie des sites de stockage du bassin parisien ANR CHARCO : systématique d'acquisition des isothermes d'adsorption du CO ₂ et du CH ₄ afin de mieux identifier les charbons les plus prometteurs pour le stockage du CO ₂ ANR CO2FIX : [Bio]-minéralisation du CO ₂ in situ dans les basaltes et les roches ultrabasiques
	Atlas français (v1), intégrant données sociologiques et sociétales des sites de stockage et de l'infrastructure de transport associée. Cet atlas sera également destiné à alimenter l'atlas européen.	Atlas (v2) : évaluation des stockages non conventionnels (une roche peu perméable peut-elle être un bon candidat pour le stockage du CO ₂ demain ?)	Atlas (v3)	
Nouvelles techniques de caractérisation des sites de stockage		Technologies de 2e génération à faible impact environnemental (ex : méthode électromagnétique)		
Modélisation géologique des sites de stockage	Modélisation 3D des formations géologiques et de leurs propriétés. Traitement des hétérogénéités et des incertitudes.	Amélioration des modèles grâce aux récoltes de données des opérations de forage et d'injection		ANR Géocarbone PICOREF : pilote pour l'injection de CO ₂ dans les réservoirs géologiques en France ANR HETEROGENEITES CO2 : évaluation de l'incidence des hétérogénéités physiques et minéralogiques sur les processus physicochimiques associés au stockage du CO ₂ dans une formation aquifère ANR SHPCO2 : simulation haute performance du stockage géologique de CO ₂

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Forage et injection (1/2)

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Spécification des techniques de forage et d'injection au cas du stockage géologique du CO₂	Maîtrise de la fracturation (augmentation de l'injectivité)			ANR Géocarbonate Intégrité : effet de l'augmentation de pression
	Acquisition de connaissances sur la durabilité des matériaux de puits.	Démonstration de la durabilité des matériaux des puits et de la gestion des autres puits existants		ANR INTERFACE : développer des connaissances sur le comportement de l'interface ciment-couverture afin de pouvoir maîtriser et prévenir son altération ANR Puits-CO2 : étude des mécanismes de dégradation des matériaux du puits (ciment et aciers) et de leurs interfaces au contact de CO ₂ contenant des gaz annexes
	Acquisition de connaissances sur l'impact des composés mineurs (gaz co-injectés, métaux ou gaz potentiellement relâchés dans le milieu naturel) sur l'ensemble réservoir/puits/couverture.	Mise à jour des composés mineurs injectés, sur la base du retour d'expérience		ANR Puits-CO2 : étude des mécanismes de dégradation des matériaux du puits (ciment et aciers) et de leurs interfaces au contact du CO ₂ contenant des gaz annexes ANR Gaz annexes : rôle des gaz annexes sur l'injection du CO ₂
	Acquisition de connaissances sur les phénomènes physico-chimiques autour du puits			ADEME SALTCO : influence des phénomènes de cristallisation sur l'injectivité du CO ₂ en aquifère ANR Proche Puits : comportement du puits et du proche puits lors de l'injection de CO ₂ ANR Géocarbonate Injectivité : maîtrise de l'injectivité du CO ₂ dans les stockages géologiques
Monitoring au cours de l'injection de CO₂	Développement et mise en œuvre de technologies de monitoring qualitatif (rôle d'alerte) et quantitatif (bilan matière)	Base de référence des technologies de monitoring et retour d'expérience sur les techniques utilisées (optimales selon la formation de stockage)		ADEME Programme IPGP : techniques de monitoring ADEME CO2VADOSE : monitoring géochimique du pouvoir de rétention du CO ₂ dans la zone proche de la surface (zone Vadose) ANR EMSAPCO2 : développement des méthodes électromagnétique et sismique active et passive pour la surveillance des réservoirs de stockage du CO ₂ ANR Géocarbonate Monitoring : surveillance et monitoring du stockage géologique du CO ₂ ANR HPPP-CO2 : monitoring géophysique des interactions fluide et roche dans la subsurface ANR Optique CO2 : monitoring des fuites in situ en temps réel (technique infrarouge) ANR SENTINELLE : monitoring de surface (couverture supérieure, sol, biosphère et proche atmosphère)

Forage et injection (2/2)

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Modélisation dynamique de la roche réservoir et de la couverture au cours de l'injection de CO₂	Méthodes et modèles pour simuler des processus couplant thermique, hydrodynamique, mécanique et chimie (THMC)	Amélioration des modèles grâce aux récoltes de données des opérations de stockage Traitement systémique des incertitudes et des écarts		<p>ANR Géocarbone PICOREF : pilote pour l'injection de CO₂ dans les réservoirs géologiques en France</p> <p>ANR HETEROGENEITES CO2 : évaluation de l'incidence des hétérogénéités physiques et minéralogiques sur les processus physicochimiques associés au stockage du CO₂ dans une formation aquifère</p> <p>ANR SHPCO2 : simulation haute performance du stockage géologique de CO₂</p> <p>ANR Carbonatation : modélisation de la dissolution et de la précipitation de carbonates dans les roches réservoirs à l'échelle du pore, de la carotte, du site.</p> <p>ANR Proche Puits : comportement du puits et du proche puits lors de l'injection de CO₂</p> <p>ANR Géocarbone Injectivité : maîtrise de l'injectivité du CO₂ dans les stockages géologiques</p> <p>ANR Géocarbone Intégrité : simulations couplées hydromécaniques et de transport réactif pour évaluer l'intégrité de la roche couverture</p> <p>ANR INTERFACE : modélisations couplées de l'interface ciment-couverture afin de pouvoir maîtriser et prévenir son altération</p>

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Sécurité/surveillance

Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Risques et impacts	Développement de méthodologies et d'outils d'analyse et d'évaluation des risques	Retour d'expérience sur des sites démonstrateurs améliorant les outils d'analyse et d'évaluation des risques		ANR CRISCO2 : critères de sécurité pour le stockage du CO ₂ : approche qualitative et quantitative de scénarios de risques ADEME MANAUS : méthodologie d'analyse unifiée et de gestion des risques liés au stockage ADEME DIS-CO2 : maîtrise des risques autour des puits d'injection ADEME EUREKA : état de l'art des impacts environnementaux et sanitaires du stockage du CO ₂
	Acquisition de connaissance sur les impacts environnementaux et sanitaires et leur maîtrise	Démonstration de l'absence d'impacts par le retour d'expérience sur des sites démonstrateurs		
Nouveaux dispositifs de prévention des fuites	Développement de techniques de prévention (membranes, fluides...)			
Remédiation	Etude économique et guide de conception de techniques et de remédiation (v1)	Tests en conditions réelles réalisés et actualisation guides (v2)	Mise à jour guides (v3)	ANR CO-LINER : intégrité des couvertures endommagées : caractérisation, modélisation et remédiation
Fermeture des sites	Etude économique et guide de conception des techniques de fermeture des sites (v1)	Tests en conditions réelles et actualisation guides (v2)	Mise à jour guides (v3)	
Surveillance à long terme	Techniques spécifiques au stockage de CO ₂ et adaptées aux temps longs Système d'alarmes avec des technologies passives Faisabilité organisationnelle pour maintenir une surveillance et garder la mémoire des sites (cf. patrimoine numérique).	Guides et outils mis à disposition d'un opérateur public pour assurer le maintien, le suivi, la mémoire des sites		
Modélisation de l'évolution dynamique des sites à long terme	Modélisation 3D de l'évolution du gaz stocké à long terme et des interactions avec les formations proches (aquifères, autres puits) Modélisation 3D globale pour des temps longs	Amélioration des modèles grâce aux retours d'expériences		ANR HETEROGENEITES CO2 : évaluation de l'incidence des hétérogénéités physiques et minéralogiques sur les processus physicochimiques associés au stockage du CO ₂ dans une formation aquifère ANR SHPCO2 : simulation haute performance du stockage géologique de CO ₂
Conflits d'usage et synergies sur les différents usages du sous-sol	Modélisation sur les conflits et synergies liés aux usages du sous-sol et mise au point de méthodologies juridiques, économiques	Outil d'aide à la décision en support à une agence de gestion des sites de stockage de CO ₂		

Transversal à la filière CSC

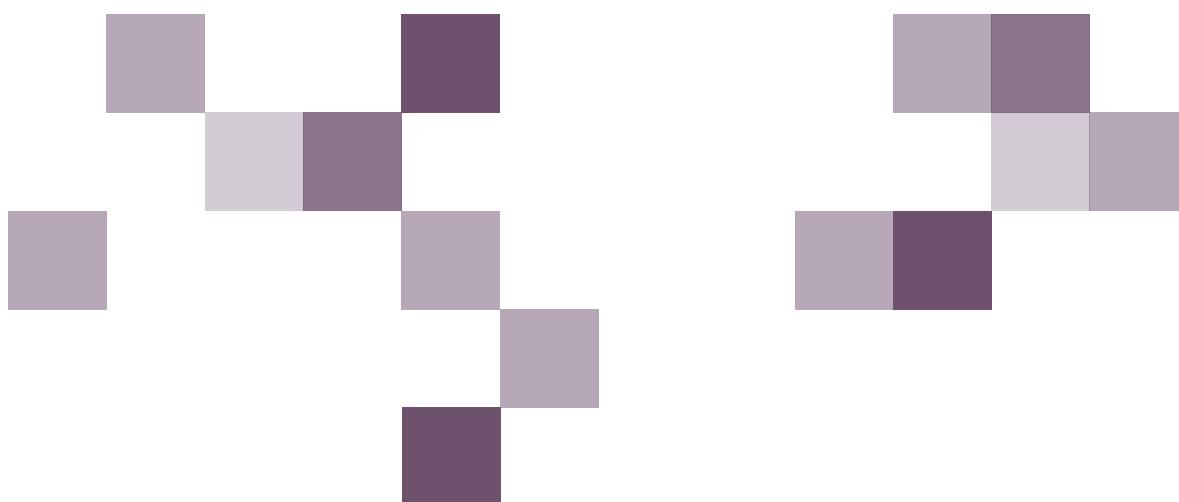
Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation			Projets de recherche ADEME/ANR réalisés ou en cours sur cette thématique
	D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030	
Logistique sur la chaîne captage/transport/stockage (ex : gestion des variations de production, d'un défaut d'un maillon de la chaîne sur les autres maillons).	Outils mathématiques d'aide à la gestion des réseaux et à la maîtrise des flux			
Modélisation économique (business model) : <ul style="list-style-type: none"> interaction entre les filières énergétiques analyse technico-économique sur les différentes options technologiques de la filière CSC 	Scénarios économiques			ANR SOCECO2 : économie et sociologie de la filière captage et stockage géologique du CO ₂
Analyses de cycle de vie (ACV)	ACV validés sur l'ensemble de la filière			
Production de bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS)	Faisabilité technico-économique de la filière BECCS, incitation financière, réglementation, mutualisation	Démonstrateurs sur les secteurs biocarburants 1 ^{re} et 2 ^e générations, centrales thermiques, industriels, biogaz		
Faisabilité sociale	Analyse sociologique des sensibilités (opportunités, blocages, contexte local et national) Compréhension des blocages et mise en place de nouveaux moyens de communication	Faisabilité sociale des filières CSC pour un déploiement à grande échelle		ADEME Etude au Havre : étude de pré-faisabilité technique et sociétale de la mise en place d'une chaîne de captage, transport et stockage de CO ₂ rassemblant les émetteurs d'un bassin (mutualisation) ANR SOCECO2 : économie et sociologie de la filière captage et stockage géologique du CO ₂

Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Valorisation du CO₂

Thématique	Axes de recherche prioritaires	Objectifs de validation		
		D'ici à 2020	2020-2030	Après 2030
Voies de valorisation du CO₂ ²⁷	Le développement de nouvelles voies de valorisation du CO ₂	Production d'algues (bioconversion) en bassins, hydrogénation	Production d'algues (bioconversion) en réacteurs, reformage sec	Biocatalyse, photoélectrocatalyse, électrolyse, thermochimie, minéralisation
Transversal	La mise au point de catalyseurs performants (rendements, robustesse face aux impuretés, coûts...) pour les voies de valorisation du CO ₂ avec transformation			
	Le rôle des composés annexes provenant de divers procédés (centrale électrique, procédés industriels, procédés de captage) sur les voies de valorisation du CO ₂			
	La production d'hydrogène de manière décarbonée			
	Analyse de cycle de vie (ACV)	ACV validées sur les voies mises en œuvre		



27 - Les voies de valorisation à cibler en priorité dans les programmes de recherche français sont décrites de façon plus approfondies dans l'étude sur le « Panorama des voies de valorisation du CO₂ » de l'ADEME (2010).

> 8. Le déploiement des technologies

La mise en place de démonstrateurs présente l'avantage de lever les principaux verrous technologiques, d'identifier éventuellement de nouveaux programmes de recherche, de mettre en œuvre des bilans économiques, d'accélérer la mise sur le marché et également d'évaluer l'acceptabilité sociale de certaines technologies.

Besoin de démonstrateurs CSC

Un **démonstrateur de recherche** doit permettre de lever des verrous technologiques liés à la taille d'un système ou à sa complexité née d'une intégration de systèmes. C'est une étape du processus de recherche-développement-industrialisation de technologies qui se situe **en aval de la recherche et en amont des phases d'industrialisation** et qui peut conduire à relancer des recherches appliquées et/ou fondamentales. Le choix de l'échelle du démonstrateur de recherche permet de passer du stade du laboratoire à une taille permettant de valider les technologies en condition d'usages réels.

Selon les experts, **deux axes sont à considérer** pour la mise en œuvre de nouveaux démonstrateurs de recherche sur la filière CSC :

- les **procédés de captage de deuxième génération** (solvants de deuxième génération, boucle chimique...), le premier appel à manifestation d'intérêt concernant des technologies de première génération ;
- les questions relatives à la **sécurité du transport et du stockage** (surveillance des installations, modélisation, gestion du stockage, complétion des puits...).

La **production de bioénergie avec captage et stockage du carbone** (BECCS) pourrait également être prise en considération ici, car il s'agit d'une technologie qui permettrait des bilans négatifs d'émissions de carbone, contribuant ainsi de manière significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le BECCS doit néanmoins intervenir en complément d'autres mesures de réduction des émissions de CO₂, telles que l'affectation des sols ou la sélection de la biomasse.

Des **projets intégrés de démonstration à grande échelle** pourraient également être mis en œuvre avec les technologies de première génération, en cohérence avec les appels à projet du NER300.

Le tableau ci-après précise la vision des experts sur les périodes de mise en œuvre des démonstrateurs (démonstrateur recherche et démonstrateur de taille industrielle) afin d'être en cohérence avec un déploiement de la filière à partir de 2020.



Feuille de route

Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO₂

Tableau 2 : Période de mise en œuvre (démarrage opérationnel) des démonstrateurs avant le déploiement commercial

	Démonstrateur Recherche	Démonstrateur de taille industrielle	Déploiement
Technologie de captage de CO ₂ de 1re génération	2010-2015	2015-2017	2020
Technologie de captage de CO ₂ de 2e génération	2010-2020	2017-2022	2025
Réseaux de transport de CO ₂	2015-2020 Du captage à un site de stockage		Après 2020, implantation progressive des réseaux
Stockage de CO ₂ dans des gisements déplétés	2010-2015	2015-2020	2020
Stockage de CO ₂ dans des aquifères salins profonds	2010-2015	2015-2020	2020-2025
Stockage de CO ₂ dans des veines de charbon inexploitable	2015-2020	2020-2030	2030
Stockage de CO ₂ dans les basaltes	2015-2020	2020-2030	2030
Stockage de CO ₂ dans d'autres types de formations géologiques	2020-2030	2030-2035	2035

Besoin de démonstrateurs de valorisation du CO₂

Les voies de valorisation du CO₂ en France sont représentées dans la figure 4 ci-dessous. Certaines, comme la culture d'algues, l'hydrogénation du CO₂ ou la minéralisation (voies 4, 5 et 10) ont atteint un degré de maturité suffisamment élevé pour qu'on puisse amorcer le développement de projets démonstrateurs.

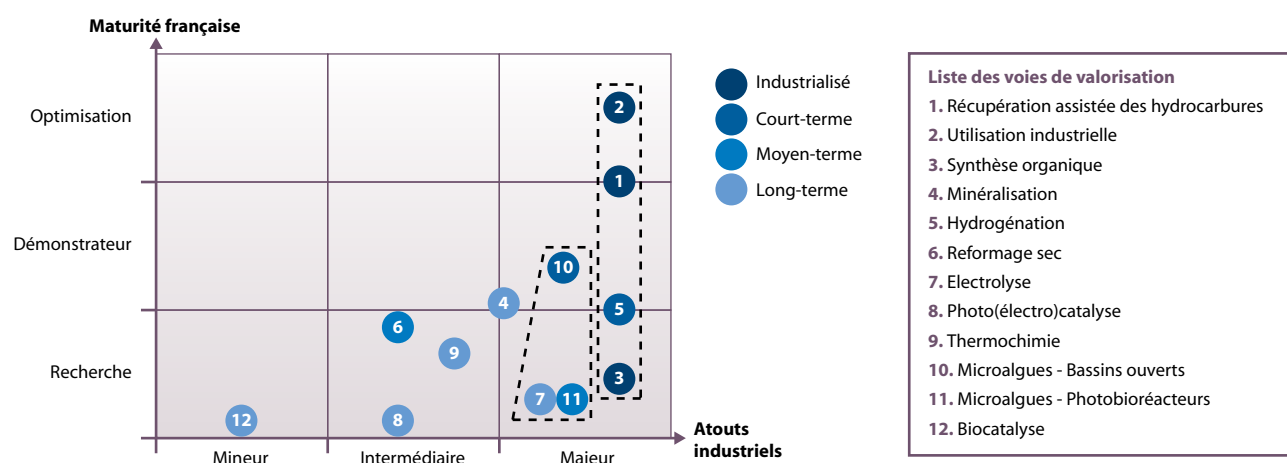


Figure 4 : Les voies de valorisation en France

Compte tenu du contexte international et de la présence de pays leaders comme le Japon ou les Etats-Unis, qui soutiennent et financent déjà plusieurs voies de valorisation (unités pilotes d'hydrogénation, aides financières aux start-up sur la culture de microalgues...), les acteurs français pourraient envisager de développer des **partenariats** et des **consortiums internationaux**.

Besoin de plates-formes technologiques

Que ce soit au niveau de la recherche ou de la mise en pratique de technologies éprouvées, la dynamique autour du CSC ou de la valorisation du CO₂ en France doit pouvoir s'appuyer sur des **réseaux d'acteurs organisés**, ce qui pourrait amorcer la structuration des filières.

L'objectif d'une **plate-forme technologique** est d'assurer le **transfert technologique entre le secteur de la recherche et le secteur industriel**. Elle **mutualise des moyens** pour offrir des services, des prestations ou des ressources qui permettent à une communauté ouverte d'utilisateurs (publics ou privés) de mener à bien leurs projets de R&D et d'innovation. Elle permet aux utilisateurs de procéder à des tests et à des essais en accédant à des moyens performants qu'ils ne pourraient développer seuls.

En cohérence avec la mise en place des Instituts d'Excellence dans le domaine des Energies Décarbonées (IEED²⁸), la création de plates-formes technologiques favoriserait :

- la symbiose entre les industriels et les laboratoires de recherche ou entre industriels,
- le test des technologies pour accompagner les choix et leur mise en œuvre,
- la levée de verrous spécifiques.

Les **plates-formes technologiques CSCV** multifonctions pourraient avoir les caractéristiques suivantes :

- être situées sur un lieu où on dispose d'une source de CO₂ (site naturel de préférence ou unité de combustion),
- permettre de tester et développer différents procédés, outils et méthodologies,
- être ouvertes à tout chercheur ou organisme, selon des conditions d'accès et des procédures *ad hoc*,
- être des lieux de R&D, mais aussi de formation, d'information et de communication sur la filière CSCV.

Autres besoins

Formation

La filière CSCV ne pourra exister que si une formation de haut niveau offrant des opportunités à l'international se développe. Des centres de formation d'excellence (LMD²⁹ ou IUT, écoles d'ingénieurs, formations continues) devront être des lieux d'échange stratégiques pour la formation d'ingénieurs français et étrangers, assurant ainsi la pérennité du savoir-faire français en CSCV.

Analyse du tissu industriel français

Afin de développer une offre compétitive française sur le CSCV, tous les acteurs seront à mobiliser, les grands groupes, mais également les PME, tant sociétés de services que de technologies. Vu la proximité avec le secteur du pétrole, le tissu existant d'entreprises serait à analyser afin de voir dans quelle mesure les compétences existantes peuvent être utilisées dans le CSCV.

Promotion des compétences françaises à l'international

Il paraît important de veiller à avoir une approche internationale coordonnée et cohérente. La participation à des initiatives internationales permet non seulement de suivre l'avancement de la filière à l'international, mais aussi de présenter les activités françaises devant un cercle élargi de participants, de prendre part à la rédaction de feuilles de route et d'établir un réseau de contacts. Des rencontres bilatérales, avec des pays choisis, pourraient être organisées, afin de rapprocher les parties prenantes et d'identifier des domaines de coopération. Cette approche nécessite une démarche coordonnée entre les pouvoirs publics, les instituts de recherche et les industriels.

28 - Les IEED sont des plates-formes interdisciplinaires industrie/recherche publique dans le domaine des énergies décarbonées.

29 - LMD : licence, master, doctorat.

L'ADEME en bref

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

www.ademe.fr

