



Les puits de carbone

Quels rôles de la recherche
pour accélérer leur
développement
en France ?





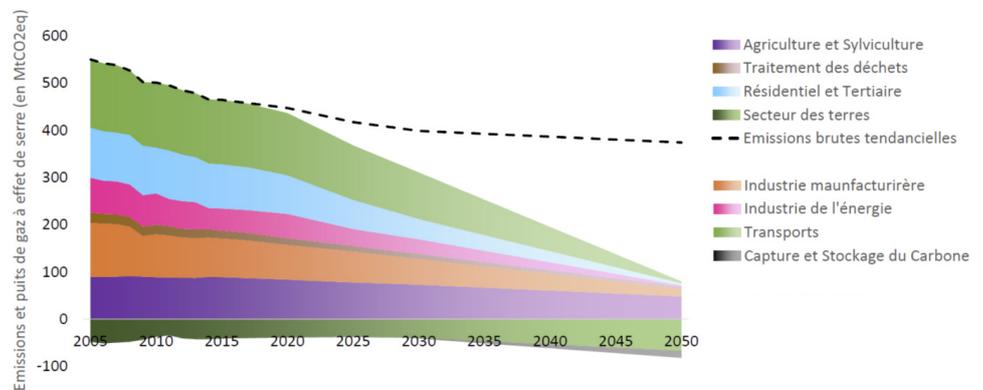
Sommaire

Introduction	3
Fiches synthétiques par famille de solutions	
Fiche 1. Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols agricoles et forestiers	5
Fiche 2. Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols en milieux urbains et anthropisés	8
Fiche 3. Le stockage du carbone dans les milieux aquatiques et par l'altération des roches	11
Fiche 4. Les solutions technologiques de captage de CO ₂ d'origine atmosphérique en vue d'un stockage géologique	14
Fiche 5. Stockage de CO ₂ dans les matériaux via la minéralisation	17
Fiche 5bis. Captage et stockage de CO ₂ biogénique dans les matériaux biosourcés	20
Fiche 6. Les solutions technologiques de captage de carbone recyclé, réusages et stockage long terme	23
Exemples de recommandations d'actions de recherche et de gouvernance	26
Acronymes	32
Sources	33

Introduction

En contribution à l'objectif national, et communautaire, d'atteindre la neutralité carbone à horizon 2050, les exercices de prospectives se multiplient afin d'anticiper les futurs possibles en termes de déploiement des solutions permettant d'atteindre cette cible. Sur la base de trajectoires de réduction des émissions sectorielles, ces travaux recourent pour la plupart, à des niveaux plus ou moins importants, à des solutions à émissions négatives (ou puits de carbone) permettant de compenser des émissions de CO₂ fossiles qu'il apparaîtrait trop difficile de réduire dans les trois prochaines décennies.

Trajectoire des émissions et des puits de gaz à effet de serre sur le territoire national entre 2005 et 2050 dans le scénario AMS (source: SNBC, 2020)



La figure ci-dessus illustre une trajectoire de réduction des émissions et d'augmentation des puits de GES permettant d'atteindre la neutralité carbone à horizon 2050 dans un des scénarios de la Stratégie Nationale Bas Carbone (scénario AMS). Comme dans la plupart des scénarios visant cette cible de neutralité à partir de 2020, le recours aux puits de carbone est nécessaire. Ces puits peuvent être assurés par la mise en œuvre de diverses solutions issues du secteur des terres et/ou des technologies de captage et stockage du CO₂ émis par l'industrie ou d'origine atmosphérique. A l'heure actuelle les puits de GES du territoire français sont essentiellement alimentés par le stockage de carbone dans des écosystèmes terrestres comme la biomasse et les sols agricoles, forestiers et zones humides, sous forme de matières organiques. Ils sont également alimentés par le stockage de carbone dans des écosystèmes côtiers sous forme de carbone organique et de carbone inorganique dissous.

Ce stockage de carbone, pour constituer des puits, doit, sur un laps de temps donné, être supérieur au relargage de carbone et croître dans le temps. L'augmentation mais aussi la préservation des puits de carbone et, dans certains cas leur restauration, sont donc des enjeux prioritaires. En vue d'augmenter ces puits et d'assurer la pérennité du stockage, plusieurs leviers sont envisageables. Parmi eux, la gestion spécifique de ces écosystèmes, mais également le développement des technologies dédiées de captage et de séquestration de CO₂ ou de carbone dans des réservoirs dédiés ou des matériaux à longue durée de vie.

A l'aune de cette transition, plusieurs questions se posent alors quant aux conditions de réalisation de ces trajectoires de déploiement des solutions puits de carbone :

- Quelles sont les solutions permettant de capter du CO₂ atmosphérique et de le stocker durablement ?
- Comment garantir l'efficacité d'un stockage durable quels qu'en soient leurs niveaux de dépendance aux activités humaine et aux événements naturels extrêmes ?
- Comment faire en sorte que les puits actuels des territoires français soient à minima préservés ?
- Quelles sont les potentialités des territoires français pour développer de nouveaux puits ? A quelles échéances ?
- Quelles actions de recherche mettre en œuvre pour atteindre ces cibles ?

Via le présent document le groupe de travail ANCRE vise à apporter un éclairage sur différentes catégories de solutions pouvant contribuer à l'augmentation des puits de carbone au niveau national.

Grâce à l'analyse des différents enjeux et verrous associés à ces solutions, des recommandations d'action de recherche et d'accompagnement sont alors définies pour quantifier leur potentiel et accélérer leur déploiement. Les sections suivantes proposent :

- Six fiches synthétiques correspondant à chacune des solutions de puits de carbone sélectionnées.
- Une sélection de sept exemples de recommandations d'actions de recherche et d'accompagnement, transverses aux différentes solutions, apparaissant parmi les plus prioritaires à développer à court terme.

Fiches synthétiques par famille de solutions

Six principales catégories de solutions contribuant au maintien et au développement de puits de carbone ont été distinguées. Parmi ces six catégories, trois catégories de solutions concernent le captage naturel du CO₂ dans des milieux plus ou moins anthropisés, et trois catégories de solutions dites technologiques ayant pour ambition d'accélérer les processus naturels et de déployer de nouveaux moyens de captage et de stockage. Le présent document propose 7 fiches descriptives pour en comprendre les principaux enjeux.

Solutions de captage naturel du CO₂ atmosphérique en milieux plus ou moins anthropisés

Fiche 1

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols agricoles et forestiers

Fiche 2

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols en milieux urbains et anthropisés

Fiche 3

Le stockage du carbone dans les milieux aquatiques et par l'altération des roches

Solutions technologiques de captage et stockage long terme du CO₂ atmosphérique

Fiche 4

Les solutions technologiques de captage de CO₂ d'origine atmosphérique en vue d'un stockage géologique

Fiche 5

Stockage de CO₂ dans les matériaux via la minéralisation

Fiche 5 bis

Captage et stockage de CO₂ biogénique dans les matériaux biosourcés

Fiche 6

Les solutions technologiques de captage de carbone recyclé, réusages et stockage long terme

Chacune des 7 fiches est composée de 4 parties comprenant :

- une description synthétique du champ d'application et l'état des lieux du déploiement de cette solution au niveau français,
- les différents enjeux associés,
- les verrous actuellement rencontrés,
- des recommandations de recherche et d'accompagnement pour accélérer son développement.

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols agricoles et forestiers



Etat des lieux

Le mécanisme naturel de la photosynthèse permet la séquestration du CO₂ atmosphérique sous forme de matière organique, à part quasiment égale, dans la biomasse agricole et forestière et les sols. Les écosystèmes terrestres français constituent déjà un puits de carbone très significatif que l'EFESE estime en Métropole à près de 20 % des émissions françaises de 2015, soit environ 90 Mt CO₂eq/an [EFESE, 2019]. Une grande majorité de ces puits sont réalisés en milieux forestiers (plus de 60 Mt en 2018 en France métropolitaine selon ADEME, 2021). En Outre-Mer et en particulier en Guyane il est considéré que ces forêts sont arrivées à leur capacité maximale de stockage de carbone et donc leur puits semble s'être interrompu (selon ADEME Guyane, 2016).

En ce qui concerne plus spécifiquement les sols métropolitains l'étude menée par INRAE en 2019 indique que les sols forestiers représentent 38% du stock total de carbone, les prairies permanentes 22% et les grandes cultures 26,5%. Ce sont ces dernières qui ont le potentiel de stockage additionnel le plus fort du fait de leur faible teneur actuelle en carbone et de l'importance de leurs surfaces. A contrario pour les sols forestiers et les prairies permanentes, à haute teneur en carbone, l'enjeu est le maintien de leur stock et la préservation des surfaces. Le rapport met en évidence les actions concrètes pour le maintien et le développement du stockage du carbone dans les sols et le type de pratiques pour y parvenir dans l'hypothèse où il n'y a pas de changement d'usage des sols. Les pratiques sont potentiellement diverses (agroforesterie, cultures intermédiaires, haies, allongement des prairies temporaires, rendus aux sols des coproduits...) et elles s'accompagnent de co-bénéfices vis-à-vis de la qualité de l'eau et de la biodiversité. Néanmoins toutes ces pratiques sont à raisonner en regard d'un contexte géographique et temporel donné (conditions pédo-climatiques, stocks d'origine, coûts de revient en adéquation avec les assolements et débouchés existants). Via cette étude, un potentiel maximal de stockage additionnel de 30 Mt de CO₂eq/an a été estimé en milieu agricole. Mais les risques majeurs qui pèsent sur ces puits de carbone sont nombreux dus entre autres à la diminution des surfaces forestières à cause des incendies, des attaques parasitaires, de la sécheresse et des réductions de surface via le changement d'usage des sols. Des travaux restent donc à mener pour améliorer la compréhension des effets de ces pratiques sur le long terme et des effets du dérèglement climatique sur le stockage et la séquestration.

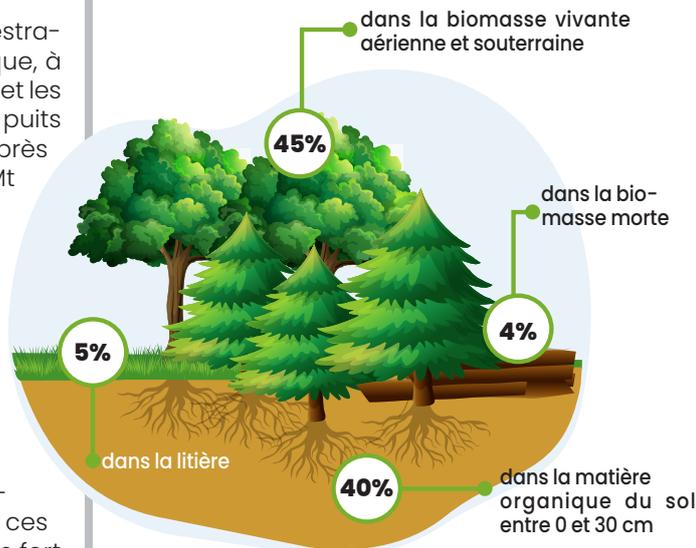
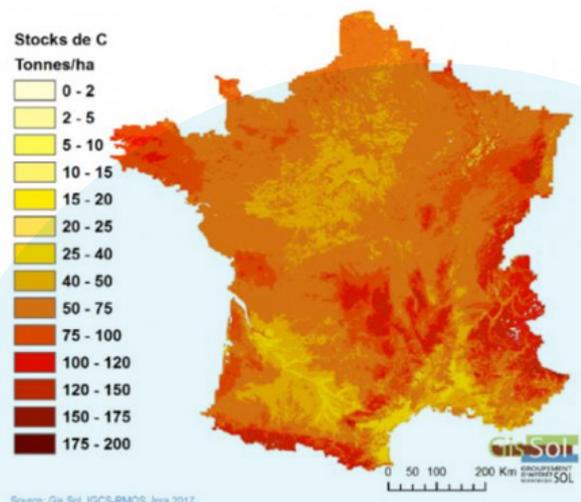


Figure 1 - Stockage de carbone en forêt (ADEME, 2021)



Source: Gie Sol, IGCS-PMQS, Inra 2017.

Figure 2 - Cartographie des stocks de carbone dans les sols métropolitains (INRAE, 2019)

Enjeux

Au niveau européen, parmi les mesures devant accompagner la dernière proposition d'objectif de réduction d'au moins 55% des émissions de GES d'ici à 2030 figurent des actions visant à préserver et étendre la capacité des puits de carbone naturels dans chacun des Etats Membres, avec des objectifs contraignants à partir de 2026. D'ici à 2035, l'Union devra s'efforcer de parvenir à la neutralité climatique dans les secteurs de l'utilisation des terres, de la foresterie et de l'agriculture [...] (Pacte Vert pour l'Europe du 14 juillet 2021).

Par ailleurs, dans sa Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC, 2020) la France attribue un rôle important aux puits de carbone naturels pour l'atteinte de la neutralité carbone à 2050 qui devront être multipliés par deux pour atteindre environ 65 Mt eq CO₂/an en 2050, dont une part croissante dans les produits bois à longue durée de vie (20 Mt, voir fiche 5bis) ainsi qu'en milieu agricole (11 Mt). Ce scénario s'accompagne d'un certain nombre de mesures telles que l'augmentation du stockage de carbone dans les sols agricoles via des changements de pratiques ; le développement d'une gestion forestière active et durable, permettant à la fois l'adaptation de la forêt au changement climatique et la préservation des stocks de carbone dans l'écosystème forestier ; le développement d'un boisement adapté au changement climatique et la réduction des défrichements.

En ce sens la France se doit dès aujourd'hui de se doter des moyens permettant la consolidation des valeurs à partir des données et des connaissances existantes en vue de préciser le potentiel réel de ces puits de carbone et d'améliorer le suivi de l'utilisation des sols et la compréhension des dynamiques du carbone au sein des écosystèmes. Il apparaît également nécessaire de construire des scénarios d'évolution chiffrés de ces puits sous impact du changement climatique.



Verrous

MANQUE DE DONNÉES

sur l'évolution actuelle des stocks et des flux de carbone dans les écosystèmes et les interactions entre carbone, azote et eau,

MANQUE DE PROJECTION

sur la dynamique de ces évolutions sous impact du changement climatique,

PEU DE REcul

historique sur les effets des changements des pratiques agricoles sur le stockage du carbone à longs termes,

ABSENCE DE SCÉNARIOS

de projection sous impact du changement climatique,

BESOIN DE TRAçABILITÉ

des compétitions d'usages des sols agricoles et forestiers avec l'artificialisation (déprises vs urbanisation),

MANQUE D'ÉTUDES ET D'INDICATEURS

sur l'évaluation des impacts environnementaux du prélèvement de biomasse,

MANQUE DE CONNAISSANCE

et de réglementation sur la valorisation agronomique des coproduits des bioénergies (digestats, biochar, ...),

CLOISONNEMENT DES FILIÈRES

agri-agro-alimentaire et énergétique, absence de vision systémique,

MANQUE DE POLITIQUES PUBLIQUES

sur le long terme et manque de cohérence entre les politiques agricoles, alimentaires et énergétiques,

Recommandations de recherche

Comportement des milieux et des produits :

- **Proposer des solutions technologiques** pour l'analyse biogéochimique in-situ (biocapteurs, capteurs géochimiques et géophysiques miniaturisés, échantillonneurs intelligents).
- **Maintenir les bases de données** et d'échantillons des sols français, y inclure la diversité de la macrofaune et de la microflore du sol.
- **Constituer des bases de données** sur les processus de transfert de matières et établir des lois de comportement permettant d'évaluer les conséquences de ces transferts (quantifier le bouclage des cycles C, N, P).
- **Analyser la sensibilité des écosystèmes** à l'exportation des menus bois et au retour des cendres au sol (Indicateurs de sensibilité pour les éléments minéraux majeurs et combinaison globale – Diagnostic de terrain).
- **Développer des approches multicritère** de la durabilité du prélèvement de la biomasse abordée sur tous les éléments : physiques, chimiques et biologiques, développer des modèles prédictifs multi-échelles de l'évolution des indicateurs de durabilité.
- **Compréhension entre la structure** des biochars et des digestats de méthanisation et leurs propriétés lors du retour au sol.
- **Développer des scénarios** de prélèvement durable de la biomasse aux niveaux des territoires sous impact du changement climatique.

Identification des pratiques :

- **En termes de pratiques sylvicoles**, développer des approches biophysique et économique pour identifier les pratiques pour une gestion durable des forêts (conversion des taillis en futaies, raisonner la préparation des sols, éviter les coupes rases avec dégradation des sols, ne pas exploiter l'arbre entier), et transférer ces pratiques stockantes aux professionnels.
- **Développer des stratégies** d'optimisation de l'atténuation du changement climatique dans le choix de la durée de révolution des peuplements à l'échelle des territoires, proposer de nouveaux peuplements avec des essences résistantes aux stress biotiques et abiotiques (plutôt que ne considérer qu'un unique critère économique).
- **Conduire des essais** sur des placettes forestières (et agro-forestières) afin d'intensifier la croissance de la biomasse et le stockage de carbone dans les sols, réaliser des bilans complets du cycle biogéochimique des placettes sur un temps long et en intégrant ensuite l'ensemble de la filière de valorisation (multi-produits) du bois.
- **En termes de pratiques agricoles** : élargir les espèces de cultures intermédiaires et affiner les pratiques d'insertion dans les rotations ; approfondir les essais d'épandage des digestats et biochars, caractériser le carbone stockable et alimenter les modèles sols/microorganismes/plantes.
- **Coupler** la pyrolyse et la méthanisation pour la qualité agronomique des digestats et favoriser son retour au sol.

Recommandations d'accompagnement

- Besoin de centraliser, recenser et expertiser des données FAIR issues des expérimentations de nouvelles pratiques et comportement des milieux,
- Déployer ou maintenir les infrastructures nationales permettant le suivi sur le long terme des cycles du C, N, P.
- Déployer les projets pouvant bénéficier d'un label bas carbone avec génération de puits de carbone en milieux agricoles et forestiers.
- Identifier l'ensemble des services écosystémiques des nouvelles pratiques.
- Renforcer les politiques publiques agricole et forestières à l'échelon national et territorial qui promeuvent des pratiques agricoles et forestières durable pour accroître le stockage du carbone.
- Identifier et reboiser les terres dégradées.
- Permettre la résilience et l'adaptation des peuplements forestiers aux effets du changement climatique de façon à assurer la préservation de leurs différentes fonctions écologiques pour mener à bien l'action d'atténuation.

Le stockage du carbone dans la biomasse et les sols en milieux urbains et anthropisés



Etat des lieux

Les milieux urbains et, plus généralement, les zones très anthropisées concernent une large gamme de milieux au sein desquels le captage et le stockage de CO₂ par la biomasse peut constituer des puits de carbone. En particulier, on peut distinguer :

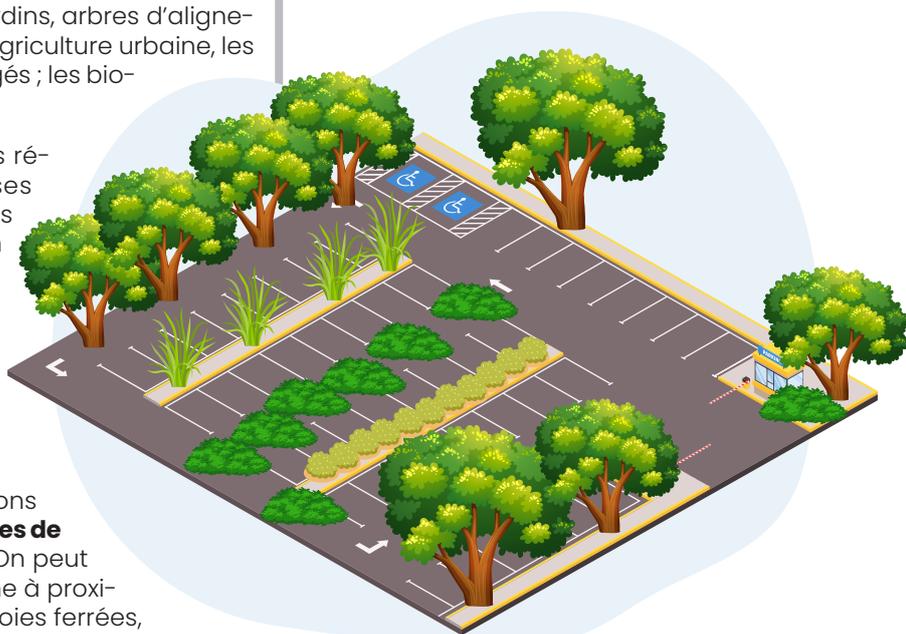
Les **espaces verts urbains** : parcs, jardins, arbres d'alignement et sols et substrats associés ; l'agriculture urbaine, les serres, en particulier les jardins partagés ; les bio-façades et toits végétalisés.

Les **friches d'activités** abandonnées récemment ou depuis de nombreuses décennies, plus ou moins réinvesties par la Nature, ou encore des friches en devenir (e.g. surfaces commerciales). Parmi elles on peut retrouver : des friches « industrielles » non converties en habitats (anciens sites industriels, friches ferroviaires) ; des friches militaires ; d'anciens sites miniers ; des friches commerciales.

Les zones perturbées par les opérations de génie civil autour des **infrastructures de transport**, et qui ont été enherbées. On peut notamment citer en zone péri-urbaine à proximité immédiate et sur les talus des voies ferrées, les grands axes routiers, les zones aéroportuaires, les surfaces occupées par les lignes à haute-tension, les zones d'implantation de panneaux solaires (e.g. fermes photovoltaïques) ne permettant pas d'associer des pratiques agricoles.

Les **zones urbanisées qui pourront être reconverties** en espaces verts, tels que les espaces dédiés aux voitures dans les villes où la voiture va être écartée.

Les milieux très anthropisés abandonnés font l'objet de l'installation de végétation (spontanée ou non), qui peut évoluer vers un écosystème cultural, prairial ou forestier fournissant une gamme large de services écosystémiques, dont le stockage de carbone. Ils peuvent aboutir sur la génération de puits de carbone, pour autant que des pratiques adaptées soient développées et appliquées. Par exemple, les friches industrielles qui sont reconverties par végétalisation pour des objectifs paysagers, de production de biomasse, d'atténuation des îlots de chaleur ou de renaturation, ou encore les opérations de restauration des fonctions du sol peuvent conduire à un stockage supplémentaire de carbone. Des technologies de construction de sol existent dans ce but et ont permis la renaturation d'anciens sites industriels et miniers.





Enjeux

Les anciens sites industriels peuvent contenir du carbone très ancien (issu de l'extraction minière et pétrolière), qui peut être retrouvé au-delà du mètre de profondeur. Ces situations montrent l'existence d'un potentiel de stockage qui peut être augmenté à partir de stratégies de gestion adaptées. Mais les informations sur les surfaces concernées manquent, ainsi que sur les pratiques actuelles qui pourraient être développées pour le stockage pour des surfaces comme les abords des routes, voies de chemin de fer, aéroports et aussi les zones de récréation très anthropisées comme les golfs. La pression foncière exercée sur ces surfaces diffère aussi fortement en fonction de leur localisation par rapport aux centres urbains (e.g. friche industrielle en zone urbaine vs. friche isolée en zone rurale) et par conséquent, leur potentiel pour le stockage de carbone varie fortement d'un point à un autre. Les stratégies en matière de gestion des villes sont aussi un facteur à prendre en compte pour l'évaluation du potentiel de stockage de carbone (e.g. politique de verdissement).

La reconversion de friches urbaines en espaces verts pourrait être appliquée à un plus grand nombre de sites destinés à être végétalisés. Elles pourraient être aussi optimisées avec une optique d'augmentation des quantités et de la durée de stockage, tout en assurant leur fonction première. Certaines de ces surfaces sont aussi très convoitées (e.g. friches industrielles) pour le développement du photovoltaïque, amenant à envisager des compromis pour assurer la gamme la plus large de services écosystémiques.

En ce qui concerne les parcs/jardins municipaux, voies ferrées et les parcelles d'agriculture urbaine, les données permettant d'évaluer les surfaces concernées ne sont pas facilement disponibles à l'échelle de l'ensemble du territoire métropolitain. Les évaluations montrent un potentiel de stockage supplémentaire total pour les friches d'activités, entre 3,5 et 4,7 Mt de CO₂eq d'ici 2050 (avec une part de surface mobilisée en 2050 à 25%, avec un total de 530 000 à 705 000 ha). Pour les zones aéroportuaires, le potentiel de stockage supplémentaire total est de 0,65 Mt de CO₂eq d'ici 2050 avec la mise en œuvre de la renaturation, sans hypothèse d'augmentation de surface. Pour les biofaçades et les toits végétalisés, le potentiel est de 0,13 Mt de CO₂eq d'ici 2050 sans hypothèse d'augmentation de surface. Il est de 0,00024 Mt de CO₂eq d'ici 2050 pour les axes routiers.

En résumé, si le potentiel existe, il n'est pas vraiment connu. Des technologies sont disponibles mais elles pourraient être optimisées avec un objectif d'augmentation du stockage tout en assurant la fourniture de services écosystémiques essentiels comme la biodiversité.

Les enjeux sont ainsi de déterminer les surfaces existantes et potentielles en milieux urbains et anthropisés permettant un stockage du carbone le plus efficace possible (en termes de quantité et de pérennité) en intégrant dans la prise de décision de l'utilisation de ces surfaces le stockage du carbone pour répondre à l'objectif de neutralité carbone en 2050, cette possibilité de stockage n'étant à ce jour ni démontrée, ni utilisée.



Verrous

MANQUE OU DIFFICULTÉS DE CHIFFRAGE RÉALISTE

des surfaces concernées et du stockage potentiel du carbone en fonction des usages.

DYNAMIQUE DE LA MISE À DISPOSITION DES SURFACES

(e.g. friches commerciales, renaturation temporaire de friches avant nouvel usage).

COMPÉTITION D'USAGE DES SOLS

et complémentarités avec les projets d'urbanisation/logements, renaturation, production d'énergie.

PRISE EN COMPTE SIMULTANÉE

du couplage stockage de carbone et de l'impact sur la biodiversité, notamment dans les sites qui ne font pas l'objet d'aménagements immobiliers.

MANQUE D'INFORMATION DES ACTEURS

- de la gestion des infrastructures de transport et développements technologiques pour adopter des pratiques stockantes (bords de route, voies ferrées, zones aéroportuaires, ...).
- du BTP, et développements technologiques permettant le stockage, notamment lors de l'excavation des terres pour la construction de bâtiments.

Recommandations de recherche

- Nécessité de mise en place d'observatoires ou suivis statistiques territoriaux pour le chiffrage des surfaces ; mobilisation des acteurs de l'aménagement du territoire (e.g. Établissements Publics Fonciers)
- Nécessité de mise en place d'observatoires et de systèmes d'évaluation des pratiques pour en quantifier les impacts sur l'évolution du stockage du carbone (pour l'ensemble des zones de stockage potentielles – BTP ; cimetières, décharges, etc.) :
 - (i) inventaire des pratiques,
 - (ii) évaluation de l'impact en termes de stockage,
 - (iii) mettre en oeuvre les pratiques stockantes identifiées pour optimiser ces pratiques et/ou leur déploiement.
- Faire des bilans d'émissions vs stockage dans les parcs, les espaces agriculture urbaine et les jardins partagés (focus sur les zones végétalisées).
- Construire de sols fonctionnels aptes à rendre une gamme large de services écosystémiques (e.g. biodiversité, stockage de Carbone, hydrologie, production d'oxygène, pollutions) :

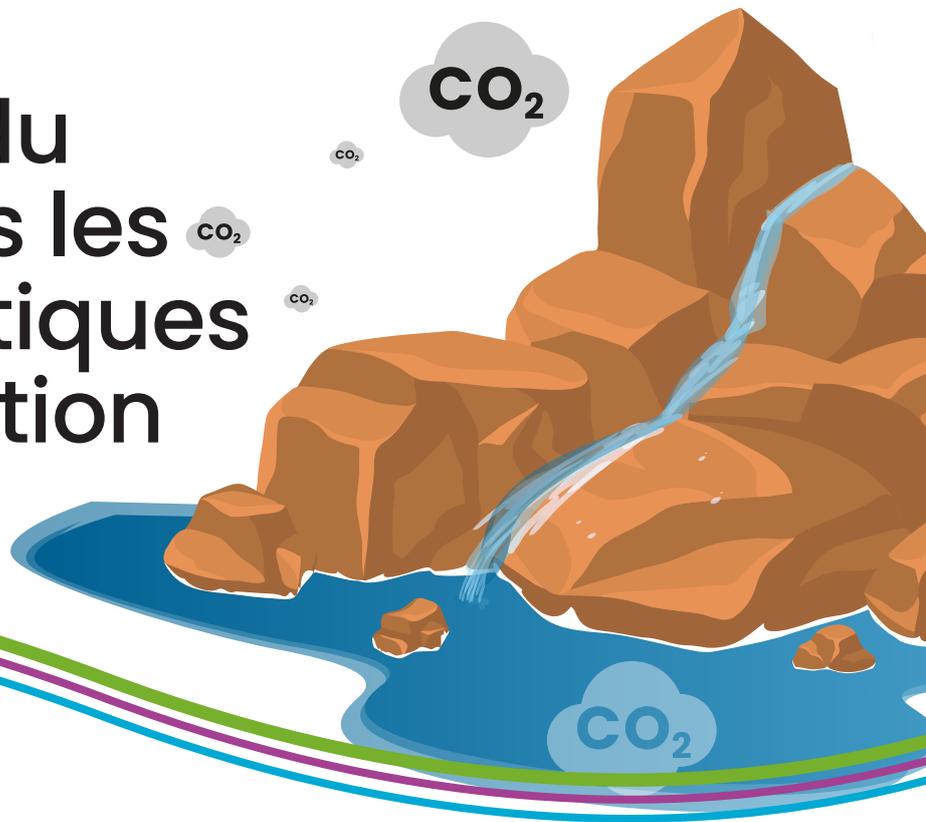
- (i) identifier quelques sites pilotes pour faire des mesures exhaustives du bilan radiatif,
- (ii) suivre des pratiques culturales dans les jardins partagés ou d'entretien des parcs,
- (iii) faire une comparaison entre les contextes urbain et agricole en termes de pratiques, d'impact sur le carbone et la biodiversité et leur évolution.



Recommandations d'accompagnement

- Inciter au développement des parcs, jardins et forêts en milieu urbain, des toits et façades végétalisés.
- Promouvoir la revégétalisation des friches et la renaturation (biodiversité) en optimisant le stockage du carbone.
- Développer de nouvelles stratégies et pratiques de stockage lors des opérations de restauration des sites dégradés et pollués.
- Mettre en place les outils de sensibilisation des acteurs de l'aménagement du territoire au changement de pratiques pour une augmentation du stockage de carbone.
- Promouvoir un meilleur transfert des savoirs et technologies innovantes concernant le stockage de carbone vers les acteurs de l'aménagement du territoire (communication, échanges...).
- Elaborer des politiques publiques incitant (réglementation, fiscalité, rémunération) au stockage de carbone sur ces espaces et à les préserver sur de longues périodes.

Le stockage du carbone dans les milieux aquatiques et par l'altération des roches



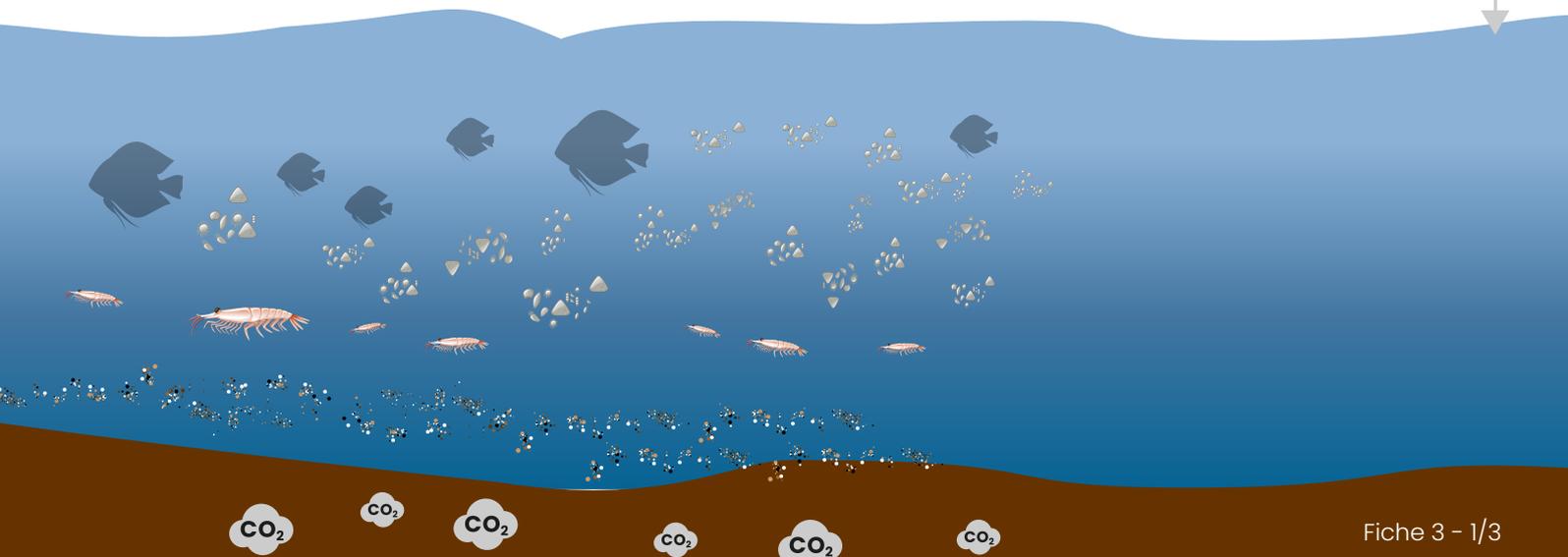
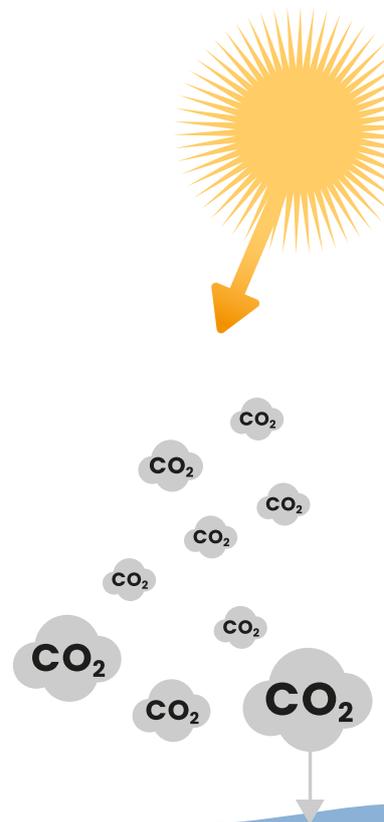
Etat des lieux

Le cycle du carbone, incluant le dioxyde de carbone (CO_2), décrit les flux de cet élément entre les différents réservoirs des enveloppes externes de la Terre, les processus biogéochimiques et les échanges physiques qui les contrôlent. Il décrit leurs stocks et leurs échanges sur des échelles de temps allant de la décennie au million d'années.

Pour la France métropolitaine et l'Outre-Mer, nous avons répertorié les mécanismes liés aux transferts nets de CO_2 depuis l'atmosphère vers les milieux aquatiques qui représentent des puits de carbone sur des échelles de temps supérieures à la centaine d'année. Nous nous sommes aussi intéressés aux processus biogéochimiques qui en sont responsables :

- ▶ Enfouissement de matière organique (MO) continentale et côtière
 Au cours de son transfert du continent vers l'océan ;
 Dans les environnements à forte productivité et enfouissement rapide comme les deltas, vasières, herbiers, mangroves, et estuaires ;
- ▶ Altération des roches silicatées et carbonatées par l'acide carbonique ;
- ▶ Pompe à carbone océanique et stockage dans les eaux intermédiaires via des processus physiques, chimiques et biologiques.

Nous avons aussi réfléchi aux capacités nationales existantes d'observation de ces flux de carbone.





Enjeux

Les enjeux que nous avons identifiés sont essentiels pour établir le potentiel de séquestration du CO₂ sur le territoire français métropolitain et Outre-Mer :

- Quantifier les flux de CO₂ atmosphérique piégé via les divers processus biogéochimiques opérant en milieu continental (roches continentales, rivières et lacs), côtier (marais, mangroves, deltas, herbiers) et océanique ;
- En milieu continental et côtier, quantifier les émissions de méthane liées à l'enfouissement de carbone organique ;
- Déterminer la sensibilité des environnements puits/sources vis-à-vis des forçages climatiques et anthropiques ;
- Mener une réflexion sur la définition du stockage par l'océan dans la zone économique exclusive (ZEE) française dans un contexte de politique internationale des émissions et de captations du CO₂
- Cartographier les zones sources et puits au niveau national dans un objectif de gestion durable du bilan carbone national.



Verrous

Les flux de CO₂ sont souvent mal contraints, voire même inconnus dans de nombreux cas. Les facteurs qui modulent l'intensité de ces flux sont encore plus mal connus ainsi que leur dépendance aux variations des paramètres climatiques et environnementaux. Par conséquent, le bilan total et l'évolution future du potentiel de séquestration du CO₂ sur le territoire français est mal défini. Pour l'améliorer, il faut mieux prendre en compte la complexité des systèmes naturels, c'est-à-dire le grand nombre de processus biogéochimiques, leur interdépendance et leur variabilité temporelle.

Domaine continental et côtier :

DYNAMIQUE DE LA MATIÈRE ORGANIQUE MAL CONNUE :

mécanismes menant à l'enfouissement et au recyclage (respiration et méthanogénèse) ;

CONNAISSANCE LIMITÉE DE L'ÉTENDUE SPATIALE DES ZONES PUIITS/ SOURCES D'INTÉRÊT.

Nécessité de cartographier la superficie nationale totale des zones d'altération des roches, des lacs et retenues de barrage, des zones côtières à carbone bleu à fort potentiel ou grande variabilité de stockage. Cela permettrait une meilleure évaluation des flux et des stocks de carbone qui pourraient être modifiés par les activités anthropiques (aménagement côtiers, ports, dragage/chalutage, assèchement pour agriculture, aquaculture, etc.) ou le climat.

COMPRÉHENSION DE L'ÉVOLUTION DE LA DYNAMIQUE DES PROCESSUS

de stockage/déstockage en relation avec les changements climatiques et environnementaux (température, événements extrêmes, transferts de nutriments et de carbone, etc.).

L'océan hauturier :

MÉCANISMES PHYSICO-CHIMIQUES

bien connus mais mal quantifiés pour le transfert de carbone vers les eaux intermédiaires avec une incertitude sur la pompe biologique et son évolution en réponse au changement climatique ;

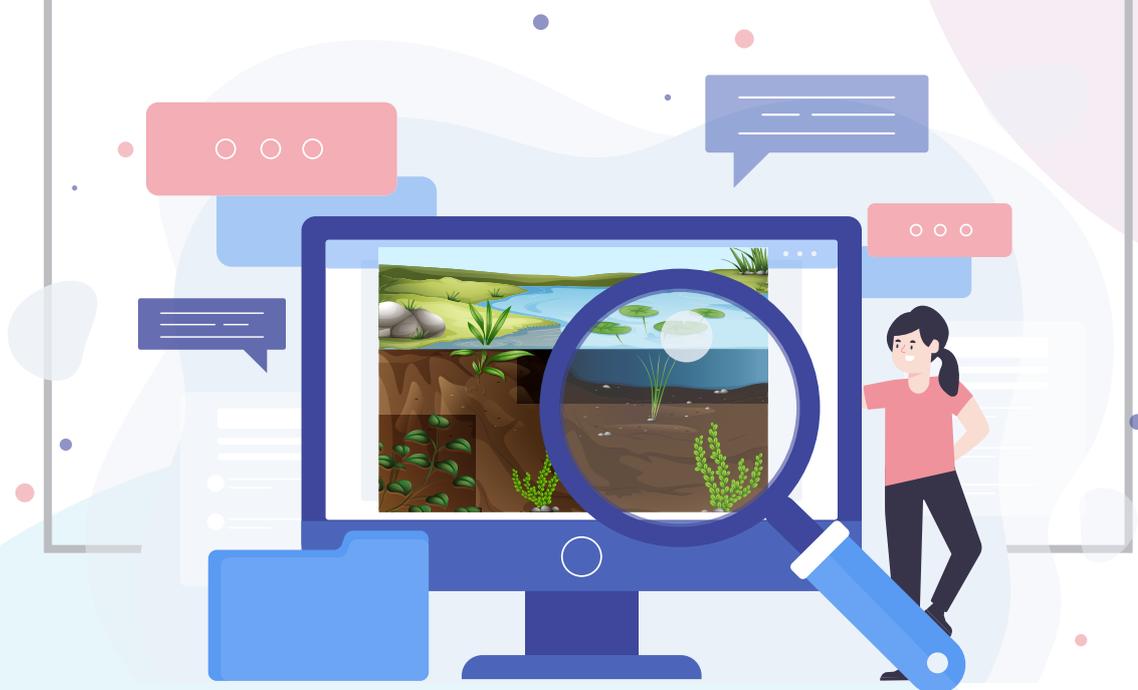
RÉDUCTION DES INCERTITUDES

sur les temps de résidence du carbone stocké avant qu'il ne soit réémis à l'atmosphère.

Actions

Nous avons identifié des actions qui nous semblent importantes pour lever les verrous identifiés et atteindre les objectifs fixés :

- Renforcer les systèmes d'observation du carbone dans les milieux aquatiques continentaux et dans le domaine côtier afin de prendre en compte la complexité des systèmes étudiés à différentes échelles spatiales et temporelles, et ainsi augmenter le volume de données disponibles pour faciliter le développement de modèles prévisionnels, voire de jumeau numérique. Cela implique de multiplier les techniques analytiques, standardiser et optimiser les procédures de mesure et d'échantillonnage. Une politique nationale de soutien, de pérennisation des observatoires existants et de création de nouveaux observatoires est nécessaire. Cela implique aussi une politique scientifique de la gestion des données produites : archivage, partage, utilisation et publication des données.
- Approfondir l'étude des processus biogéochimiques puits et source de CO_2 par compartiments et déterminer leurs constantes de temps. Calculer des bilans nets de carbone prenant en compte CO_2 et CH_4 . Cela permettrait de modéliser et simuler la réponse des flux et stocks de carbone aux changements anthropiques et climatiques futurs.
- Mener des recherches évaluant le potentiel de piégeage du CO_2 par la protection, la préservation et la restauration des milieux considérés comme des puits de CO_2 .
- Engager des réflexions sur la manière de considérer le stockage océanique dans la ZEE française dans le contexte politique international des émissions de gaz à effet de serre, sachant que le stockage est non permanent, et mouvant d'une ZEE à l'autre.



Les solutions technologiques de captage de CO₂ d'origine atmosphérique en vue d'un stockage géologique



Etat des lieux

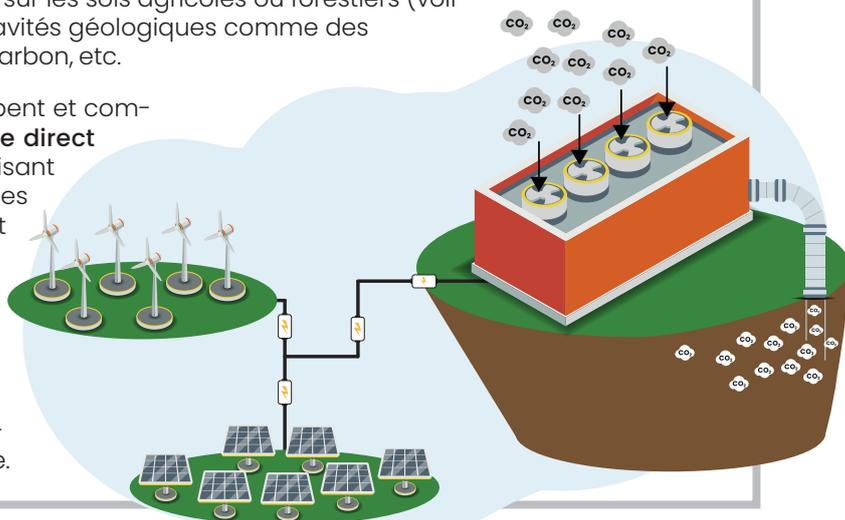
Des technologies de captage et stockage du CO₂ permettent, non seulement de réduire les émissions de CO₂, mais aussi de réduire le CO₂ présent dans l'atmosphère (c'est-à-dire de réaliser des émissions négatives) via notamment :

- Les bioénergies avec capture et stockage du carbone (BECCS) où l'on capte le CO₂ émis par un procédé de combustion utilisant de la biomasse comme combustible ou des procédés industriels alimentés par de la biomasse et où l'on stocke le CO₂ dans le sous-sol ;
- Le captage direct de l'air (DAC) qui consiste à capter directement du CO₂ déjà présent dans l'atmosphère et, in fine, le stocker durablement dans le sous-sol.

La bioénergie avec captage et stockage du CO₂ (BECCS) est la plus mature des technologies d'élimination du carbone de l'atmosphère, dans la mesure où à la fois la bioénergie et le CCS ont fait leurs preuves séparément à l'échelle commerciale. Le principe est le captage et stockage d'un CO₂ biogénique émis par une combustion de la biomasse ou des procédés industriels alimentés par de la biomasse. Plusieurs installations sont en opération dans le monde, la plupart associées à la fermentation pour la production d'éthanol.

Une variante aux BECCS consiste en la récupération de carbone solide sous forme de biochar coproduit par le procédé de pyrolyse de la biomasse pour la production d'énergie (chaleur, électricité, carburant) et de composés chimiques (cf. par exemple Lambiotte à Prémery). Le biochar est un concentré de carbone biogénique pouvant être épandu sur les sols agricoles ou forestiers (voir fiche n°1) ou encore stocké dans des cavités géologiques comme des carrières, anciennes mines de sel, de charbon, etc.

Par ailleurs, plusieurs sociétés développent et commercialisent des procédés de **captage direct du CO₂** de l'atmosphère, la plupart utilisant des procédés de captage basés sur des sorbants solides. Ces installations sont encore au stade de pilotes, la plus importante pouvant capter quelques centaines à 4 000 tonnes de CO₂/an. L'intérêt du captage direct du CO₂ réside dans la possibilité d'installer le système de captage proche de la zone de stockage et/ou d'une production d'énergie décarbonée abondante et peu chère.





Enjeux

Les enjeux pour la **bioénergie avec captage et stockage du CO₂** portent :

- 1 - sur l'adaptation des technologies de captage aux différents niveaux de concentration du CO₂ biogénique issus des unités bioénergies ;
- 2 - sur la mise à l'échelle de certaines technologies de conversion de la biomasse non encore démontrées à l'échelle commerciale (conversion hydrothermale, biocarburants à partir de microalgues, etc.) ainsi que
- 3 - la faisabilité technico-économique de l'ensemble du système BECCS ;

Ces différents enjeux devront s'accompagner de la maîtrise des différents flux de carbone tout au long du cycle de vie du système de façon à assurer un bilan négatif des émissions.

Le principal enjeu pour le **captage direct dans l'air** réside dans la réduction de la pénalité énergétique des procédés et de son coût de mise en œuvre, la concentration du CO₂ dans l'air (0,04%) étant environ 300 fois plus faible que dans les fumées.



Verrous

Parmi les verrous à aborder en priorité, on citera, pour la bioénergie avec captage et stockage du carbone ou du CO₂ :

LA STRUCTURATION DE LA FILIÈRE

de mobilisation des ressources biomasses pour pouvoir monter en capacité,

LE DÉVELOPPEMENT D'EQUIPEMENTS

de combustion flexibles et adaptés à la variabilité de la biomasse et aux besoins en chaleur sur site

LE DÉVELOPPEMENT DE PROCÉDÉS DE CAPTAGE DE CO₂

adaptés aux contraintes des émissions en termes de composition et de débit des fumées

L'INTÉGRATION DE LA SÉPARATION DU CO₂

aux procédés de gazéification et de pyrolyse.

Pour le captage direct dans l'air :

LA MONTÉE EN ÉCHELLE

en intégrant l'impact sur les ressources énergétiques et sur les matériaux nécessaires,

L'INTENSIFICATION DES PROCÉDÉS,

et l'optimisation énergétique et la disponibilité de sources d'énergies décarbonées,

LA MISE AU POINT DE MEDIA

de séparation de CO₂ à faible impact environnemental,

LA LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE

des sites de captage en fonction des réglementations carbone et des disponibilités des énergies renouvelables.

Le principe d'émissions négatives nécessite un stockage long-terme du CO₂ d'origine atmosphérique sous différentes formes (de gaz en réservoirs souterrains, solide en sols superficiels ou sous forme de matériaux, etc.). Les verrous du stockage du CO₂ dans des formations géologiques sont ceux de la filière CCS :

LA PERCEPTION SOCIÉTALE

de l'usage du sous-sol pour stocker du CO₂,

LA DISPONIBILITE DES INFRASTRUCTURES DE STOCKAGE

dans un temps compatible avec les besoins d'injection de CO₂ des projets en cours de développement

LE DÉVELOPPEMENT D'APPROCHES D'ÉVALUATION

des impacts, de prévention des risques et des mesures correctives ainsi que des technologies de surveillance long-terme.

Les verrous du stockage long terme du carbone solide présent dans les biochars (issus de la pyrolyse de la biomasse) au sein de bio-mines sont l'étude de la stabilité mécanique et chimique du biochar, les enjeux environnementaux (lixiviation de composés présents dans les biochars par les eaux), et l'ingénierie du stockage (optimiser le rendement en termes de masse de carbone densifié dans le biochar par unité de volume disponible).

Les verrous associés au stockage dans les sols agricoles et forestiers font l'objet de la fiche n°1, les verrous associés au stockage dans les matériaux font l'objet de la fiche n°5.

Recommandations de recherche

Renforcer la recherche et innover

- Améliorer les procédés de captage et épuration du CO₂ pour la conversion thermique et biochimique de biomasse et de déchets, notamment **l'adaptabilité à la variabilité des intrants**. En ce sens il convient de (i) consolider et analyser les bases de données de caractérisation des propriétés de la biomasse (et des fumées de combustion) et (ii) d'identifier les composants ou molécules susceptibles de présenter un risque pour les sites de stockage connus.
- **Réduire la pénalité énergétique** de la chaîne de procédés en améliorant l'intégration énergétique des procédés de captage du CO₂ atmosphérique notamment, ainsi qu'en raisonnant les besoins énergétiques en valorisant la chaleur fatale ou bas-carbone lorsqu'il y a lieu.
- Instruire le développement de procédés de **captage modulaires** pour pouvoir baisser les coûts et permettre la récupération de CO₂ issu d'installations de petites tailles
- Etudier le **stockage de biochars** en cavités souterraines (création de biominés) sur différents aspects interdisciplinaires : (i) l'ingénierie du stockage (optimiser la densité de carbone stockée par unité de volume apparent), (ii) les intérêts socio-économique (les potentiels conflits d'usages/conflit d'usages à l'échelle du pays ou des territoires), (iii) les impacts environnementaux (stabilité du carbone, étude des émissions gazeuses et liquides).

Identifier et quantifier les capacités de stockage adaptées

- Poursuivre l'exploration, la sélection et la caractérisation des **sites de stockage** (réservoirs géologiques profonds, anciennes mines/carrières, ...) sur le territoire français (métropole Dom Tom ; onshore et offshore) ainsi que les disponibilités de capacités de stockage transfrontalières.

Développer des projets démonstrateurs

- Valider les **performances des technologies bioénergies** existantes (centrales biomasses, unités biocarburants) en vue de leur connexion à un système CCS ; mais aussi démontrer des systèmes BECCS innovants sur de nouvelles technologies bioénergies avancées (biojet, biométhane, bioraffineries multiproduits, etc.).
- **Optimiser les solutions logistiques** des différents flux (CO₂, biomasse) : (i) intégrer les réseaux de transports existants en France et des réseaux transfrontaliers (gazoduc, oléoduc, voies maritimes/fluviales, ...) en regard des sites d'émissions, de stockage et d'utilisation ; (ii) définir les besoins de dimensionnement des réseaux de transport en regard des flux de CO₂ et leur saisonnalité.
- Tester la gestion des **flux de CO₂** (captage et transport) **à petite échelle** (dans des lieux potentiellement proches de la biomasse mais éloignés de lieux de stockage).
- Développer des **démonstrateurs intégrés de captage direct dans l'air** adaptés aux conditions locales (accès à une énergie décarbonée, accès à un site de stockage ou une conversion du CO₂...)

Recommandations d'accompagnement

Développer les méthodes d'analyses d'impacts

- Développer les méthodes d'analyse environnementale multicritère (notamment de type Analyse de Cycle de Vie) sur base de bilans matière (dont le carbone) et énergie détaillés (issus des démonstrateurs) permettant (i) d'optimiser les filières (du sol au carbone séquestré en incluant l'ensemble des produits) ; (ii) d'appréhender les conflits d'usage et les impacts potentiels sur l'environnement, l'usage des sols et la biodiversité ; (iii) d'extrapoler un déploiement à grande échelle sur le territoire national.

Développer des stratégies d'engagement

- Déployer des actions de concertation et de co-construction des parties prenantes de la société civile sur les filières et les projets, notamment en vue de communiquer et d'informer sur le principe et les risques du stockage.

Soutenir le lancement de premières industrielles

- qui permettront de lancer la filière, réduire les risques et gagner en compétences.

Stockage de CO₂ dans les matériaux via la minéralisation



Etat des lieux

La minéralisation est une voie de stockage du CO₂ dans les matériaux. A partir de CO₂ issu de la bioénergie, de captage atmosphérique ou de fumées industrielles, elle consiste en l'accélération du processus naturel de carbonatation connu pour son rôle dans la régulation du climat. Les cations (Ca, Fe, Mg) des matériaux se combinent avec le CO₂ en présence d'eau pour former des carbonates stables. La minéralisation se conçoit principalement dans des réacteurs ex-situ qui permettent d'en optimiser le rendement. A partir de roches, de résidus miniers ou de déchets, cette voie d'utilisation du CO₂ peut produire des matériaux utiles à valeur commerciale.

Ce domaine est dominé par les USA, la Chine, le Canada, la Corée du Sud, l'Australie et le Royaume-Uni.

Il est en rapide expansion, avec des entreprises commerciales comme Carbon8, Carboncure, Solidia Technologies ou MCI. Une analyse panoramique révèle une maturité élevée de la filière de minéralisation calcique ex-situ, naturellement compatible avec la filière des matériaux de construction.

Techno	Cibles	Produits	Impact carbone	Gisements calciques		Gisements magnésiens	
				Naturels (ex. wollastonite)	déchets (ex. phosphogypse, sidérurgie, déconstruction)	naturels serpentinisés (ex. lizardite)	naturels et déchets non serpentinisés (ex. olivine, scories)
				Ca ²⁺ , Ca(OH) ₂ = intermédiaire de minéralisation		Mg ²⁺ , Mg(OH) ₂ = intermédiaire de minéralisation	
EX-SITU	Matériaux de Construction bas carbone	Granulats	Puits de carbone		🇫🇷	🇫🇷	
		Additions minérales	Puits de carbone			🇫🇷	🇫🇷
		Pièces préfabriquées	Puits de carbone				
		Béton	Puits de carbone				
		Carbonate de Ca / Mg précipité	Puits de carbone			🇫🇷	
		Ciment	Carbone évité			🇫🇷	🇫🇷
	Autre	Co-récupération de métaux	Puits de carbone		🇫🇷		🇫🇷
		Co-production de H ₂	Puits de carbone				
IN-SITU	Stockage		Puits de carbone				

Maturité élevée & développements commerciaux identifiés
 Recherches identifiées
 Pas ou peu exploré

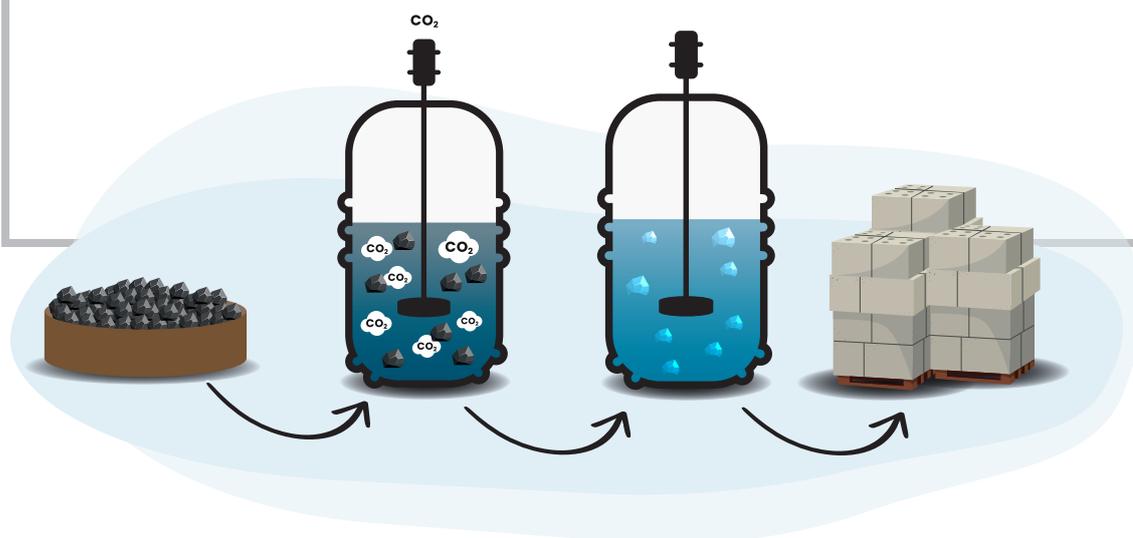
Les acteurs industriels français sont TotalEnergies, LafargeHolcim, Vicat, Air Liquide, Arcelor Mittal, Imerys, EDF, Eramet, Solvay, Suez, Veolia et du côté recherche, CNRS, CEA, BRGM, CSTB, Université Gustave Eiffel, Université de Toulouse (LGC), Université de Lyon (ICBMS), Université de Paris et Université de Lorraine. Le développement de la minéralisation en France se situe essentiellement au niveau de la R&D pour la production de matériaux valorisables à partir de déchets industriels, avec des projets comme CARBOVAL¹, FASTCARB², VITAMINE³ ou VALORCO⁴. Le couplage entre la minéralisation et l'extraction de métaux (Sté MeCaWaRe), la production d'H₂ ou l'épandage d'olivine finement broyée pour le captage de CO₂ atmosphérique figurent parmi les pistes de recherche les plus récentes.

1/ CARBOVAL (Minéralisation de déchets issus de l'industrie minière) porté par l'Université de Toulouse
 2/ FASTCARB (Minéralisation de béton recyclé) porté par l'UGE et 22 partenaires
 3/ VITAMINE (Minéralisation de déchets de CVE) porté par EDF
 4/ VALORCO (Valorisation du CO₂ sidérurgique) porté par ArcelorMittal

Enjeux

Atteindre la neutralité carbone en 2050 implique pour la minéralisation du CO₂ de proposer et déployer des solutions technologiques adaptées au contexte français, au confluent des gisements de matériaux carbonatables, des gisements de CO₂ et des marchés. Le gisement de CO₂ est l'une des clés du développement de la minéralisation. Ce gisement pose des questions en termes de quantité, qualité, disponibilité et valeur économique, durant et après la période de transition qui conduira au mix énergétique totalement décarboné prévu par la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC). La minéralisation du CO₂ à partir des sous-produits ou déchets industriels concerne essentiellement les déchets de déconstruction (béton, plâtre), les cendres et produits de combustion de charbon ou de pétrole, les produits d'incinération (mâchefers, REFIOM), les résidus de l'industrie minière, les laitiers de la sidérurgie et les résidus stockés en crassiers. Il est évalué que la minéralisation des quelques 2 milliards de tonnes de résidus alcalins produits annuellement dans le monde pourrait permettre, directement et par évitement, de réduire les émissions anthropiques de CO₂ de 12,5% (Pan, SY et al. 2020). Sur la base 2019, il est estimé que le gisement français de déchets carbonatables aurait pu permettre de stocker environ 6 Mt de CO₂⁵. Ce gisement est amené à évoluer dans le temps. Malgré la disparition anticipée de certains déchets d'ici 2050, comme par exemple les cendres et résidus de crassiers, de nouveaux procédés de fabrication qui intègrent la minéralisation du CO₂ pourraient à cet horizon accroître le gisement de matériaux carbonatables au-delà de 20 Mt de CO₂. Cette estimation est fortement associée au secteur de la construction qui a la capacité de faire des ciments/bétons de vrais puits de carbone avec des volumes de CO₂ stockés très importants. La question de la disponibilité d'un CO₂ biogénique, c.à.d. non issu de ressources fossiles, est un point de vigilance.

5/ Estimation à dire d'expert sur la base des déchets carbonatables disponibles (compilation des masses de déchets issus des différentes filières en France, outremer compris)



Verrous

Le développement et le déploiement de filières de minéralisation du CO₂ en France (6 à 20 Mt de CO₂ équivalent) repose sur l'accès à et la mise en synergie des :

GISEMENTS DE CO₂

(non issus du fossile) constants dans le temps, à proximité de gisements de matériaux, avec une teneur élevée sans éléments pénalisants.

GISEMENTS DE MATÉRIAUX CARBONATABLES

en quantité suffisante, de qualité constante, à proximité des sources de CO₂.

MARCHÉS CIBLES POUR DES PRODUITS

à valeur ajoutée (ex. matériaux de construction, Carbonate de Calcium Précipité, agents ignifuges, charges minérales, impression 3D).

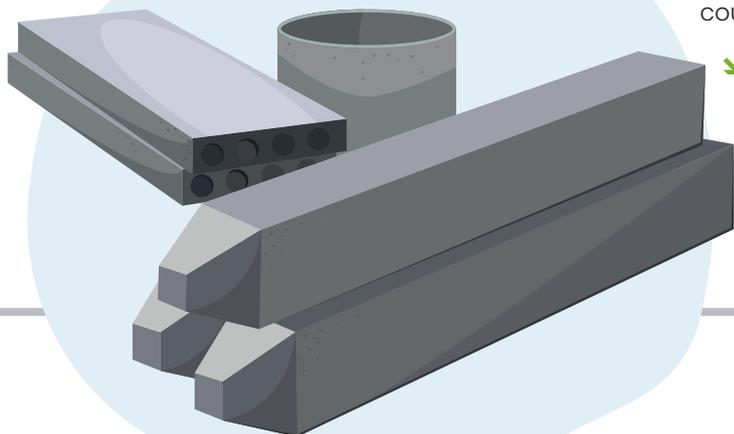
Il existe peu d'acteurs français sur le développement des technologies de minéralisation du CO₂, et pas encore d'acteurs commerciaux opérant des pilotes ou démonstrateurs de taille industrielle sur le territoire national. De par le caractère local des gisements (CO₂, déchets) et marchés associés, la minéralisation du CO₂ paraît adaptée à l'échelle des PME. Les filières de minéralisation doivent impérativement s'appuyer sur l'évaluation systémique du bénéfice économique et environnemental sur le territoire où leur déploiement est envisagé. La valorisation des coproduits de la minéralisation (ex. H₂, métaux) est un levier supplémentaire pour soutenir le développement économique de la minéralisation du CO₂.

Actions

Les actions prioritaires pour accompagner le déploiement en France de filières de minéralisation du CO₂ relèvent de toutes les échelles de TRL, depuis la recherche jusqu'au déploiement industriel.

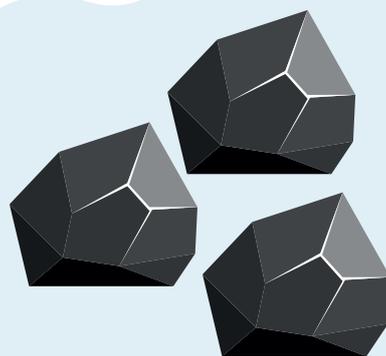
Recommandations de recherche

- Enrichir les bases de données thermodynamiques et cinétiques pour la quantification du potentiel de minéralisation des gisements.
- Accroître les cinétiques de minéralisation dans des conditions de mise en œuvre les plus favorables possibles (ex. avec le développement de voies catalytiques ou biologiques innovantes).
- Développer des technologies innovantes visant le plein emploi des gisements carbonatables.
- Explorer toutes les voies de valorisation possibles des produits de minéralisation, pour tous types de déchets et gisements de CO₂ (ex. matériaux de construction, piégeage de métaux toxiques présents dans les déchets, fonctionnalisation de produits, etc.).
- Développer les procédés de minéralisation multi-produits (ex. couplage avec production de métaux, d'H₂, etc.).
- Intégrer la minéralisation du CO₂ à l'écoconception des produits.
- Explorer le couplage entre minéralisation du CO₂ et DAC, le DAC étant le seul procédé de captage capable de produire un flux de CO₂ contrôlé qui corresponde précisément à la capacité de consommation du CO₂ d'un procédé donné d'utilisation du CO₂.



Recommandations d'accompagnement

- Cartographier les gisements de CO₂ et de déchets carbonatables sur des critères de performance environnementaux et économiques propres au développement de filières de minéralisation (développement d'un SIG dédié à la minéralisation).
- Développer des méthodes de quantification de l'impact environnemental et économique des technologies et filières de minéralisation à l'échelle territoriale.
- Développer les technologies d'intégration de la minéralisation dans les systèmes industriels de production.
- Etudier les synergies entre minéralisation et stockage géologique du CO₂, là où les flux de CO₂ et les flux de minéralisation ne peuvent être égalisés.



Captage et stockage de CO₂ biogénique dans les matériaux biosourcés



Etat des lieux

Les produits et matériaux biosourcés font partie des filières de la bioéconomie actuellement en plein essor. Après la récolte, une partie du carbone contenu dans la biomasse (agricoles ou forestières) peut être stockée dans des produits biosourcés. Pour constituer une solution de puit de carbone potentielle, les produits biosourcés doivent notamment avoir une durée de vie significative et un fort potentiel de substitution (via le remplacement de filière fossiles fortement émettrices). Parmi eux on peut citer les matériaux du secteur du bâtiment, des composites des secteurs transports, sports et loisirs, les matériaux de la voirie et les revêtements routiers, et enfin les emballages, palettes et textiles. Une augmentation de la durée de vie de ces produits ou une croissance de la demande de ces matériaux impliquant une production supplémentaire de biomasse, peut conduire à la génération de puits de carbone. A l'heure actuelle la principale filière de stockage de carbone dans les matériaux biosourcés est le bois de construction et d'aménagement dans le secteur du bâtiment ainsi que dans une moindre mesure le bois d'emballage et papier. En 2016 le stock total de produits bois s'élevait à environ 436 Mt de CO₂eq (CITEPA) et un puit de 1,5 Mt de CO₂eq a été généré sur l'année. Le scénario AMS de la SNBC envisage à 2050 une baisse du puit forestier au profit des produits bois dont le puit annuel s'élèverait à 21 Mt de CO₂eq/an, soit 25% de l'ensemble des solutions de puits envisagées.

Les géants du bâtiment ont désormais tous un pied dans le biosourcé, à l'instar de Vinci avec sa filiale Arbonis ou de Bouygues Construction et sa marque de construction bois WeWood, lancée en 2020.



Enjeux

Les pistes de développement des puits de carbone à partir de matériaux biosourcés sont multiples avec notamment (i) l'augmentation du marché des produits biosourcés se substituant à des filières fortement émettrices, tout en maintenant, voire augmentant, le stock de biomasse sur pied, (ii) la valorisation d'autres sources de biomasses actuellement peu développées comme le chanvre, le lin, le liège, les pailles, etc., (iii) l'allongement de la durée de vie des produits via le réemploi, le réusage, le recyclage, ou encore (iv) en adoptant des solutions de fin de vie moins émettrices comme le compostage, la construction de sols, la production d'énergie + CCS (BECCS), etc.

L'implication des acteurs historiques et de nouvelles start-up s'intensifie et les perspectives de marché de plusieurs produits sont déjà attendues à la hausse comme les bétons et isolants (ADEME, 2021). Parmi les principaux enjeux du développement de ces filières notons que la balance commerciale de la filière bois est aujourd'hui déficitaire, la valorisation d'une récolte plus importante nécessite de développer un tissu industriel qui puisse soutenir de telles évolutions.



Par ailleurs en vue d'un bénéfice sur le climat il convient d'assurer une bonne gestion des ressources biomasses mobilisées évitant un déstockage du carbone sur pied au profit de filières à plus courte durée de vie. Il convient par ailleurs d'adapter des systèmes de production mobilisant historiquement des ressources fossiles ou non biogéniques. Des innovations technologiques sont également attendues pour développer les solutions de réemploi et recyclage de ces matériaux. Enfin, pour l'ensemble des filières matériaux biosourcés, la gestion de la fin de vie des produits doit systématiquement intégrer l'évitement du retour à l'atmosphère du carbone contenu en identifiant et déployant les solutions les plus adaptées à chacune des filières.

Par ailleurs en vue d'un bénéfice sur le climat il convient d'assurer une bonne gestion des ressources biomasses mobilisées évitant un déstockage du carbone sur pied au profit de filières à plus courte durée de vie. Il convient par ailleurs d'adapter des systèmes de production mobilisant historiquement des ressources fossiles ou non biogéniques. Des innovations technologiques sont également attendues pour développer les solutions de réemploi et recyclage de ces matériaux. Enfin, pour l'ensemble des filières matériaux biosourcés, la gestion de la fin de vie des produits doit systématiquement intégrer l'évitement du retour à l'atmosphère du carbone contenu en identifiant et déployant les solutions les plus adaptées à chacune des filières.

Il convient par ailleurs d'adapter des systèmes de production mobilisant historiquement des ressources fossiles ou non biogéniques. Des innovations technologiques sont également attendues pour développer les solutions de réemploi et recyclage de ces matériaux. Enfin, pour l'ensemble des filières matériaux biosourcés, la gestion de la fin de vie des produits doit systématiquement intégrer l'évitement du retour à l'atmosphère du carbone contenu en identifiant et déployant les solutions les plus adaptées à chacune des filières.

Verrous

Pour le développement des marchés des matériaux ex biomasse :

GESTION DES PEUPELEMENTS FORESTIERS FRANÇAIS

non adaptée (besoin d'augmentation des capacités de production de sciage résineux, favoriser la substitution du BO résineux par du feuillus, mobiliser davantage de résineux (plantation)

MANQUE D'ACCEPTABILITÉ

des acteurs historiques de la construction,

VARIABILITÉ DE LA QUALITÉ

et de l'accessibilité du bois et autres sous-produits agricoles.

PARFOIS SURCOUT DE CERTAINES

biomasses agricoles (lin, chanvre...).

Pour la gestion des fins de vie :

TECHNIQUES ET INFRASTRUCTURES

de recyclage encore peu déployées et prise en charge des coûts non opérationnelles,

FILIÈRES DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

peu développées en France (les produits partent majoritairement vers la Belgique),

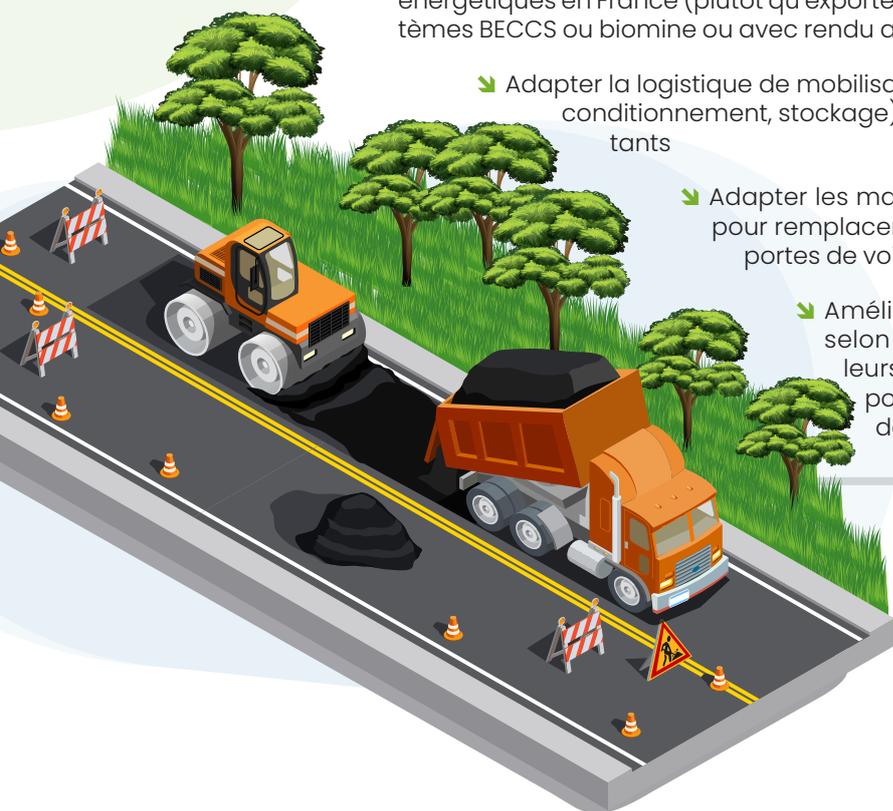
VALORISATION ORGANIQUE (COMPOSTAGE, RENDU AU SOL)

non démontrée sur de nombreux matériaux (isolants, bétons, ...).

Actions

Actions de recherche

- Raisonner la croissance des filières bois matériaux en regard de la disponibilité en ressources françaises dans le respect des règles de gestion durable des forêts
- Identifier, développer et prioriser les voies de fin de vie de chacun des matériaux vers des solutions stockantes
- Pour les matériaux valorisable en fin de vie en énergie, développer les filières de valorisation énergétiques en France (plutôt qu'exporter à l'étranger) puis les intégrer dans de futurs systèmes BECCS ou biomine ou avec rendu au sol
 - Adapter la logistique de mobilisation de la biomasse et sa qualité (prétraitement, conditionnement, stockage) aux procédés de production de matériaux existants
 - Adapter les matériaux biosourcés aux usages existants (ex : lin pour remplacer la fibre de verre, chanvre pour le garnissage de portes de voiture).
 - Améliorer la quantification des effets de substitution selon les filières concurrentes, les usages du bois et leurs évolutions futures prenant en compte le comportement des consommateurs et les mécanismes de marché



Actions d'accompagnement

- Développer un suivi statistique des marchés de matériaux biosourcés et de l'origine des ressources
- Poursuivre la normalisation des produits feuillus/règlementation sur l'usage des matériaux
- Orienter la sylviculture vers la production de bois de qualité répondant aux critères des matériaux ciblés (élargissement des gammes de dimension ou de qualité admissibles en scieries)
- Développer d'avantage les filières de valorisation du bois feuillus français
- Privilégier la substitution des matériaux les plus énergivores et les énergies fossiles les plus émettrices de GES
- Communiquer sur l'effet climat/puit des filières biomatériaux dont le stockage peut parfois être + sûr qu'en forêt.
- Faire la promotion au niveau régional des usages à longue durée de vie issue d'une gestion forestière durable, en parallèle de l'incitation à l'utilisation du bois énergie
- Poursuivre le développement des circuits/acteurs du recyclage/réusage
- Recenser et organiser des circuits de collecte des sous-produits industriels organiques à vocation matériaux
- Relocaliser les industries de transformation en France pour valoriser les ressources locales
- Monter en compétences sur les filières « bois techniques ».

Les solutions technologiques de captage de carbone recyclé, réusages et stockage long terme

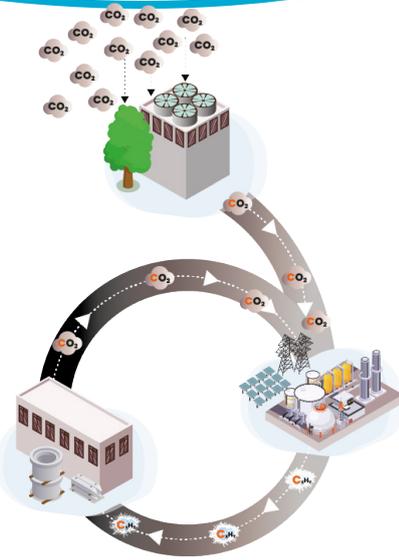


Etat des lieux

Dans l'optique d'une analyse liée à la fonction de puits de carbone, le captage et le recyclage du CO₂ généré par une activité anthropique, peut être classé en différentes catégories, selon les utilisations :

- usage en minéralisation. Le carbone du CO₂ devient constituant d'un matériau et il peut être stocké durablement. Ceci devient, un puits de carbone durable si l'origine du CO₂ est atmosphérique (voir fiche 5)
- réusages successifs de CO₂ atmosphérique direct, ou après captage en unité bio-énergies/bioraffinerie ou de biomasse direct en matériaux biosourcés (dont les problématiques hors réusages sont traitées dans les fiches 4 et 5bis)
- mise en circuit fermé de carbone industriel concentré biogénique ou atmosphérique dans une ou plusieurs installations industrielles.

Les projets de mise en circuit fermé de CO₂ sont qualifiés de CCU pour Carbon Capture and Usage. Ils mobilisent à l'heure actuelle du CO₂ industriel concentré ou fossile à visée de neutralité carbone. Le stockage du carbone n'est pas alors ce qui motive la synthèse des molécules. Celles-ci sont destinées à fournir avant tout des services industriels et énergétiques sans recourir à une extraction primaire des ressources fossiles. Elles permettent donc la réduction des émissions de CO₂ plus qu'un éventuel puit. Cependant, certains procédés industriels et produits associés pourraient être susceptibles de produire des émissions négatives en introduisant du CO₂ capté d'origine atmosphérique dans une boucle industrielle fermée. La France dispose déjà de projets de recherche et démonstrateurs dans les domaines de la production de combustibles ou de molécules à haute valeur ajoutée potentiellement initiateurs de ce type d'approche, comme JUPITER 1000¹, Methycentre², CIMENTALGUE³, VASCO2³, HYNNOVI⁴, REUZE⁴, HYNNOVERA⁴ HyCaBioMe⁵. De nombreux autres projets émergent actuellement dans le cadre des programmes soutenus par l'ADEME (ZIBAC) dans les zones de Dunkerque, de Fos sur mer et du Havre, ainsi que via « innovation Fund⁶ » et les IPCEI⁷. Le transport maritime français communique par ailleurs sur une stratégie d'économie circulaire du carbone considérant effectivement l'utilisation du CO₂ en boucle fermée. Dans ce concept, des navires de marchandises pourraient embarquer des infrastructures de captage et de stockage du CO₂ émis par leurs propres cheminées. Le CO₂ issu de la combustion des carburants de ces navires serait donc capté en totalité, stocké sous forme comprimée ou liquéfiée dans le navire qui le déchargerait au port, à destination par exemple de l'usine de carburants de synthèse (qui pourrait approvisionner ces mêmes navires). Via cette filière un volume significatif de carbone serait ainsi séquestré durablement en boucle fermée et pourrait générer des émissions négatives, dans le cas d'une utilisation de CO₂ d'origine biogénique ou atmosphérique. La durée suffisamment longue (plusieurs dizaines d'années) de ce cycle fermé reste la condition indispensable pour attribuer le statut de puits à ces filières.



Vers le développement de filières de valorisation et de réusage du CO₂ pour une séquestration durable

1 / JUPITER 1000, démonstrateur Power to Gas avec capture de CO₂ issu de l'industrie chimique porté par GRTgaz

2/ Methycentre, projet de Méthanation de CO₂ biogénique provenant d'un biogaz, porté par Storengy

3/ CIMENTALGUE et VASCO2, projets de production d'algues à partir de CO₂ industriel, porté respectivement par VICAT et le Port de Marseille

4/HYNOVI, REUZE et HYNNOVERA, usines de production de carburants de synthèse à partir d'hydrogène renouvelable et de CO₂ industriel.

5/ HyCaBioMe, projet de conversion H₂ et CO₂ par méthanation biologique

6/ Innovation Fund : programme de financement européen - https://ec.europa.eu/clima/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund_en

7/ "Important Projects of Common European Interest" (IPCEI) : mécanisme européen de promotion de l'innovation - https://competition-policy.ec.europa.eu/state-aid/legislation/modernisation/ipcei_en.



Enjeux

La caractérisation d'émissions négatives / puits de carbone ne peut être dissociée de la durée pendant laquelle ce carbone est retiré de l'atmosphère pour en tirer les bénéfices sur le plan du climatique. Une mise en cohérence entre la durabilité d'un puits de carbone et les mécanismes climatiques impactés par la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère apparaît donc nécessaire. Ce point reste délicat à trancher car la littérature ne fait pas ressortir de consensus de durée précise d'après nos recherches. Une échelle de l'ordre de 100 ans est mentionnée, durée autorisant, a priori, une transition de l'humanité vers la neutralité carbone. Faut-il supposer qu'une durée de séquestration équivalente à la durée de résidence d'une molécule de CO₂ dans l'atmosphère après son émission (de l'ordre du millier d'année) est nécessaire pour affirmer qu'un procédé de séquestration de CO₂ dans un produit être qualifiable d'opération ayant induits un de puits de carbone ?

De fait, la qualification d'un procédé ou d'un produit contenant du carbone doit prendre en compte cette temporalité et les conditions éventuelles à entretenir sur la durée à maintenir pour assurer l'effectivité d'un puits de carbone à l'échelle de la problématique. Si un produit dispose d'une vie courte mais peut être recyclé, ces conditions sont par exemple, :

- que le taux de recyclage soit très performant (proche de 100%)
- que ce recyclage soit opéré et garanti sur toute la durée minimale estimée nécessaire pour qualifier cette utilisation du CO₂ comme puits de carbone.

Si la durée de 100 ans est prise comme référence comme durée de séquestration du CO₂ dans les produits issus de CCU, alors les produits chimiques, carburants et polymères ne peuvent représenter des vecteurs favorables à la génération de puits de carbone sauf dans ce cas d'un recyclage très efficace et pérenne dans le temps.

Cela pose donc des questions de **performances des procédés de recyclages** associés aux principes de dispersion ou de collecte de ces produits. Il existe peu, voire pas, d'exemple de produits actuellement recyclés à des taux proches de 100% à des échelles industrielles ou 100% de la production est recyclée. Le secteur de l'acier est probablement celui qui atteint les meilleures performances de recyclage sur le plan du procédé mais qui reste toujours dépendant des stratégies amont de collecte.

De même, la condition de garantie d'un recyclage d'un produit pendant une durée de 100 ans constitue un enjeu. Il apparaît difficile de faire le pari que rien au cours du prochain siècle ne saurait rompre ce processus vertueux du recyclage (intérêt économique, produits concurrents, conflit majeur, besoins de valorisation sous une forme de valorisation partielle délaissant la valeur du carbone).

L'enjeu est donc de :

- parvenir à identifier des procédés et/ou des produits issus de la conversion/valorisation du CO₂ susceptibles de générer des puits de carbone sur des durées suffisantes (100 ans au moins).
- mettre au point des systèmes de recyclage/réusage efficaces qui assurent des usages pérennes à iso qualité de service et a un cout abordable.



Verrous

A priori, excepté la minéralisation, il n'existe pas aujourd'hui de procédés de CCU permettant le stockage pérenne et donc la génération d'émissions négatives. Ces procédés ne constituent pas des puits de carbone sur la base des exigences proposées et du service attendu. En compléments des verrous associés aux étapes de captage et stockage évoqués dans les fiches 4 et 5, on peut cependant examiner certains verrous techniques spécifiques comme :

LES VERROUS TECHNICO-ÉCONOMIQUES

associés aux problématiques de la collecte et du tri, du recyclage (consommation d'énergie, rendement), du réusage (nettoyage, maintien des performances produit), que l'on rencontre également dans la problématique des matériaux biosourcés (fiche 5bis),

L'INTÉGRATION DES SYSTÈMES DE CAPTAGE

et de synthèse dans le tissu industriel existant

LA PRODUCTION MASSIVE D'ÉLECTRICITÉ

nécessaire aux procédés de type CCU (captage du CO₂ et conversion à l'aide d'hydrogène décarboné),

L'IDENTIFICATION DE SYSTÈMES DE CAPTAGE INNOVANT

du CO₂ à l'échappement, comme celui émis à l'échappement des véhicules à moteurs thermiques, à l'image de la stratégie évoquée par les navire du transport maritime.

Actions

Avant de mentionner les actions éventuelles, il est important de faire quelques recommandations sur la façon de considérer le CCU. Ces recommandations entrent dans les actions d'accompagnement.

Actions d'accompagnement

- Ne pas systématiquement associer la notion de puits de carbone/émissions négatives aux procédés de CCU avec solution de stockage.
- Les procédés de CCU vers matériaux polymères, molécules chimiques et carburants, sont pour la plupart des solutions de réduction des émissions de CO₂ ou solution d'évitement, basées sur un recyclage de carbone.

Lorsque le CO₂ est recyclé et valorisé dans des produits à courte durée de vie (carburant, chimie, etc.), les chaînes de production doivent être associées à d'autres filières récupération de tout ou partie du carbone pour envisager la génération de puit (ex : système BECS décrit



En matière d'actions de recherche, en vue de distinguer les solutions d'évitement et de puit, il est donc important de :

Actions de recherche

- Évaluer les systèmes grâce à des analyses multicritères incluant les aspects techniques, économiques et bilan carbone selon des approches « du puit à la roue ». Ceci nécessite le développement de méthodes. Les évaluations viseront à établir, par des bilans, le service rendu, le gain en matière d'émissions et les contraintes de ces systèmes (liées notamment à la nécessaire production massive d'énergie décarbonée).
- Développer des systèmes de captage efficaces du CO₂, afin d'aboutir à des taux de recyclages élevés. Si ces systèmes existent pour des procédés industriels fixes et centralisés, ils nécessitent du développement et le développement d'une filière de transport ou de captage spécifique du CO₂ pour les systèmes décentralisés (résidentiels) ou mobiles.
- Développer les systèmes de conversion efficaces du CO₂ à différentes échelles, afin de produire des combustibles ou des matériaux.
- Développer l'interconnexion des systèmes de conversion du CO₂ avec les systèmes et lieux de captage. Ceci peut signifier le développement du transport de CO₂ comme matière première et donc le développement d'infrastructures (pipes, réseaux, etc.), par exemple entre la zone de dessoutage de CO₂ à quai et l'infrastructure de production de carburants de synthèse.

**Exemples de
recommandations
d'actions de
recherche et
de gouvernance**

Développer les observatoires de flux de carbone en milieux naturels

L'ensemble des écosystèmes terrestres et aquatiques est soumis à des phénomènes biogéochimiques complexes s'accompagnant de flux de carbone dans le sens des émissions et des absorptions contribuant significativement au taux de CO₂ présent dans l'atmosphère. En vue d'en limiter les émissions et augmenter les absorptions il convient de partir d'observations fines de ces mécanismes de manière à en améliorer la compréhension et en anticiper les effets. Ceci nécessite des avancées multidisciplinaires significatives dans la compréhension de la dynamique du carbone dans les écosystèmes terrestres, de la quantification des stocks et flux à différentes échelles spatio-temporelles, et des interrelations du cycle du carbone avec les autres cycles biogéochimiques dont celui de l'eau, le tout dans un contexte de changements globaux. Le programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) exploratoire FairCarboN¹ entend développer la contribution des écosystèmes continentaux à l'atténuation du changement climatique et à la neutralité carbone.

Quatre pistes liées aux observations des stocks de carbone et des processus qui les affectent ont été identifiées :

- 1 Mettre en place des services d'observation (via l'INSU, IFREMER, INRAE, BRGM) coordonnés, dédiés au carbone** et répartis dans les grandes infrastructures de recherche (IR) visant à l'observation de ces milieux comme le réseau des Observatoires de la Zone Critique (OZCAR), l'IR Littorale et Côtière (ILICO), ou la future IR hauturière. Les paramètres observés devraient être reliés aux flux de carbone instantanés (échange de CO₂ avec l'atmosphère) mais également aux puits pérennes (préservation du carbone dans les sédiments des milieux côtiers et les deltas).
- 2 Effectuer un recensement cartographique de ces puits potentiels de carbone** afin d'estimer les stocks de carbone dans ces zones et les flux de CO₂ associés : dans les milieux aquatiques continentaux (rivières, lacs, zones humides, zones montagneuses), côtiers (littoraux, vasières, herbiers, mangroves, deltas et plateaux continentaux) et hauturiers (ZEE pacifique).
- 3 Etudier la stabilité et la sensibilité du stockage de carbone aux paramètres climatiques et environnementaux** qui seront modifiés au cours du 21^e siècle. Les variations observées dans le milieu naturel sur le long terme, ou lors d'événements extrêmes comme des vagues de chaleur ou des tempêtes intenses, ou celles simulées en mésocosmes (en laboratoire, en Ecotron ou in situ) pourront être utilisées pour étudier et modéliser la capacité des écosystèmes à stocker le carbone.
- 4 Développer et systématiser la modélisation des processus physiques-chimiques-biologiques.** Une telle démarche permettra ainsi d'extrapoler au-delà des zones observées, de faire des projections pour le futur (21^e siècle) et d'introduire dans les modèles une meilleure prise en compte des écosystèmes cruciaux dans le stockage du carbone.

Avec ces outils, un appui aux politiques publiques de gestion durable de l'environnement orientées carbone pourrait intervenir sur des bases scientifiques : mise en place de zones naturelles protégées autour des puits de carbone naturels (tourbières, marais, deltas), et augmentation du pouvoir de stockage du carbone de ces zones (extension, transformation par renaturalisation).

^{1/} PEPR FairCarboN : Lancé le 11 avril 2022, il est doté d'un budget de 40 millions d'euros sur 6 ans, financé dans le cadre du PIA 4. Il diffuse un premier appel à projets en avril pour soutenir cinq projets ciblés, afin de fédérer la communauté française et accroître sa visibilité internationale, renforcer les dialogues interdisciplinaires, multi-milieux et multi-acteurs, : <https://anr.fr/PEPR-Explo-FairCarboN-AAP-2022>

Développer des méthodes et pratiques stockantes en milieux plus ou moins anthropisés

Les milieux au sein desquels des modes de gestion ou pratiques de stockage de carbone peuvent être développées rassemblent les milieux évoqués dans les fiches 1, 2 et 3 précédemment décrites.

Les actions de recherche liées aux stockages du carbone dans les milieux anthropisés se déclinent dans quatre directions : la mesure du potentiel, l'optimisation des pratiques stockantes à partir des mesures quantitatives du stockage, la sensibilisation des acteurs et l'anticipation de l'évolution des impacts liés aux effets du changement climatique.

1 Alors que les sols agricoles et forestiers bénéficient déjà de recensement réguliers, les milieux urbains et périurbains recouvrent une grande variété d'occupation et de gestion des sols dont le suivi n'est pas systématique. Un premier enjeu serait de répertorier et mesurer les surfaces susceptibles de stocker du carbone. Un **recensement cartographique** nécessite la mobilisation de l'ensemble des acteurs de l'aménagement du territoire et la mise en place d'observatoires.

2 La quantification de l'impact des pratiques actuelles en termes de stockage du carbone nécessite la mise en place de systèmes d'évaluation à partir de **bilans quantitatifs** en fonction des conditions climatiques et agronomiques. A l'image de l'initiative 4/1000 (INRAE, 2019) réalisée pour le secteur agricole, des initiatives similaires peuvent être menées en milieux forestiers et urbains. Une comparaison entre les contextes urbain et agricole en termes de pratiques et d'impact sur le stockage du carbone et de leur évolution peut également être menée. Ces données permettront une **optimisation des pratiques stockantes** en fonction des surfaces anthropisées concernées, en intégrant l'ensemble des services écosystémiques associés (biodiversité, îlot de chaleur, qualité de l'air, ...). A noter que la quantification du stockage potentiel du carbone dans les sols est indissociable de la quantification de l'azote afin d'être en mesure d'évaluer les effets de long terme de ce stockage.

3 A partir de l'évaluation des surfaces utilisables pour stocker du carbone, les différents **acteurs concernés par la gestion et l'usage de ces surfaces doivent être sensibilisés** à la nécessité de prendre en considération le stockage du carbone et l'évitement du relargage dans les modes de gestions des différentes surfaces. Ces acteurs sont très divers, au premier rang desquels on trouve les collectivités territoriales, les exploitants autoroutiers, ferroviaires ou aéroportuaires. Le déploiement des méthodologies du **Label Bas Carbone** contribue à cette démarche d'implication des acteurs du territoire.

4 Une fois les pratiques stockantes déterminées dans un contexte pédoclimatique donné, il convient d'alimenter les modèles permettant **d'anticiper les éventuels impacts du changement climatique** sur ces pratiques ainsi que de mesurer les impacts de ces pratiques sur la limitation du changement climatique.

Exemple 3

Fiche Solution n°4

Développer les connaissances sur les réservoirs géologiques nationaux

Un rapport récent de l'ADEME (ADEME, 2020) propose une cartographie des différents sites de stockages géologiques du CO₂ en France et une analyse de leurs enjeux et potentiels de stockage. Au-delà de l'identification des sites de stockage il ressort un besoin important de travaux complémentaires sur la **maitrise des différentes caractéristiques des réservoirs**. Parmi ces caractéristiques on compte notamment la porosité des roches, leur épaisseur, leur perméabilité, en vue notamment de mesurer le niveau d'étanchéité des dits réservoirs. La stabilité de l'environnement est également à prendre en compte. Il convient par ailleurs d'anticiper la tolérance des réservoirs aux composés constitutifs des gaz séquestrés, permettant ainsi de déterminer au cas par cas le niveau de purification des gaz requis par le réservoir avant séquestration.

L'évaluation des capacités de stockage des réservoirs est également à préciser. En effet, selon le rapport de l'ADEME, des travaux sont en cours pour développer des nouvelles méthodes de calcul de capacités de stockage via des modélisations dynamiques intégrant plusieurs paramètres pouvant potentiellement réduire l'espace disponible (pression du réservoir, migration du nuage de CO₂ pendant l'injection).

Au-delà de l'étude des réservoirs de stockage de CO₂ gazeux, la France pourrait également être dotée de **réservoirs de stockage de carbone solide ou Biomines**. Parmi eux, des anciennes mines de charbon ou autres carrières pourraient en effet être des lieux dédiés à un stockage temporaire ou long terme de carbone biogénique solide de type biochar ou autres sous-produit de la bioéconomie. Ce type de stockage est aujourd'hui au stade de réflexion. En premier lieu, un **recensement des sites potentiels** de stockage de cette forme de carbone pourrait par ailleurs être mené sur le territoire français. Des études sur la stabilité mécanique et chimique du biochar sont déjà en cours, en vue d'une valorisation agronomique via son épandage sur sols agricoles. Dans l'optique d'un stockage en cavité, d'autres recherches sur la **densification de ces biochars** en « lingot » ou « pain de carbone » pourraient également s'avérer pertinentes pour gagner en volume et en stabilité.

Exemple 4

Fiches Solution n°4 et 6

Développer des projets démonstrateurs nationaux pour les technologies à émissions négatives

Parmi les solutions de puits technologiques, la fiche solution n°4 mentionne le captage et la séquestration de CO₂ biogénique émis par les usines de production de bioénergie (BECCS). Il s'agit d'une solution à l'étude depuis de nombreuses années pour laquelle les problématiques liées au captage et au stockage sont proches de celles des sites industriels envisagés pour le déploiement du CCS en sens large. Si dans certains contextes, leur capacité à générer des émissions négatives a été démontrée, seuls quelques pays disposent aujourd'hui d'installations à échelle industrielles (USA, Canada, Japon, Norvège, Royaume-Uni). La France dispose de nombreuses installations bioénergies coproduisant du CO₂ captable (chaleur bois, cogénération bois, méthaniseurs, éthanoleries, etc.), d'un important potentiel de déploiement de nouvelles énergies issues de la biomasse, ainsi que de la proximité de réservoirs géologiques potentiellement accessibles. Des installations industrielles de production de charbon de bois pourraient par ailleurs être des lieux de démonstration de bioraffineries avec stockage du biochar. Néanmoins, il n'y a pas de projet démonstrateur BECCS annoncé en France à ce jour.

Ces projets démonstrateurs viseraient la mise à l'échelle et l'intégration des énergies renouvelables ou sources d'énergie décarbonés avec les technologies de captage et traitement du CO₂ afin d'en réduire les coûts, augmenter l'efficacité énergétique et environnementale, et rendre les systèmes répliquables. Ils pourraient notamment permettre :

- d'évaluer la faisabilité de systèmes modulaires de captage/traitement sur des sites émetteurs de CO₂ de faible capacité (méthanisation, combustion biomasse, ...),
- d'identifier les moyens de transports les plus adaptés en cas de non proximité d'un site de stockage,
- de déterminer les capacités pour lesquelles les modules de captage et transport du CO₂ sont économiquement viables,
- d'identifier les localisations de sites industriels les plus adaptés (proximité des ressources biomasses, des usages des bioénergies ou du stockage du CO₂),
- de s'assurer de la fonction de puits de carbone du système en intégrant l'ensemble des flux de carbone stockés et émis, sur la base de données réelles, tous au long du système de production.

Exemple 5

Fiche Solution n°5

Un SIG expert pour le déploiement de la minéralisation du CO₂

La mise en contact entre des déchets alcalins (ex. mâchefers, cendres) et du CO₂ peut permettre de produire des matériaux (ex. granulats, additions minérales) à forte demande, en grande quantité, pour le secteur de la construction notamment. Aussi appelée minéralisation, cette solution d'utilisation du CO₂ est à la fois un vecteur de décarbonation et de circularisation de l'économie. Du fait de la localisation géographique des gisements de déchets et de CO₂ qui en constituent les entrants, mais aussi des marchés qui peuvent en utiliser les produits, le déploiement de filières industrielles et de technologies de minéralisation se conçoit difficilement sans ancrage territorial.

Pour soutenir le déploiement de filières économiques et le développement de technologies innovantes et performantes de minéralisation du CO₂, la mise en place d'un Système d'Information Géographique Expert (EXGIS) national dédié à la minéralisation du CO₂ est recommandée. Sur un maillage qui couvre l'ensemble du pays, ce système donnera accès à toutes les informations clés pour concevoir et chiffrer des filières technologiques de minéralisation. Ces données incluront notamment toutes les caractéristiques pertinentes pour la minéralisation, sur des horizons temporels courts à longs, de quantité et qualité des gisements alcalins et des émetteurs de CO₂, existants ou envisageables, ainsi que les caractéristiques des marchés susceptibles d'utiliser les produits minéralisés. Le système expert qui sera couplé au SIG apportera un chiffrage prospectif et régionalisé des filières possibles de minéralisation en termes environnemental, économique et technologique. Un tel système permettra d'identifier et d'orienter des filières potentielles, de soutenir les initiatives entrepreneuriales associées et les projets de démonstration nécessaires pour tester la minéralisation à grande échelle, et pourra servir de guide performanciel au développement de technologies innovantes de minéralisation.

Exemple 6

Fiches Solution n°1, 2, 3, 4, 5 et 6

Amélioration et harmonisation des méthodes d'évaluation environnementale des solutions à émissions négatives

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale normalisée permettant de calculer différents types d'impacts associés à un produit, un système de production ou encore un service, en prenant en compte l'ensemble des étapes du cycle de vie des produits et services, depuis l'origine des ressources mobilisées jusqu'à la fin de vie des produits et services. Ce type d'analyse est couramment utilisé pour évaluer les impacts des filières de la transition énergétique sur le changement climatique. Ce type d'approche, prenant en compte l'ensemble des processus impliqués dans les filières, apparaît nécessaire à l'accompagnement du développement de solutions à émissions négatives en vue de justifier du bilan carbone négatif du système considéré. Elle est également nécessaire pour comparer les performances environnementales de différents systèmes sur le changement climatique mais aussi dans d'autres catégories d'impacts comme l'utilisation des terres notamment. Pour mener à bien ces évaluations, le développement de lignes directrices méthodologiques, en renfort du cadre normatif existant pour l'ACV, est encore nécessaire. Il permettra d'harmoniser les pratiques et une juste comparaison entre des systèmes intégrés de natures très différentes (systèmes de production agricoles avec rendu au sol vs technologies de production d'énergie avec CCS) et visant l'atteinte de plusieurs objectifs différenciés (baisse du niveau de CO₂ atmosphérique mais aussi production d'énergie, fourniture de matériaux, etc.). Il convient par ailleurs d'améliorer les outils ACV en vue d'intégrer la dimension temporelle au sein de l'inventaire (évolutions technologiques au sein des systèmes) et lors de la caractérisation des impacts (distribution temporelle des phases d'émissions et de captures de CO₂). Enfin l'enrichissement ou la création de bases de données d'inventaires partagées et harmonisées, par exemple via des modules thématiques, permettraient une plus grande robustesse des résultats et de faciliteraient l'intégration de nouvelles données issus des projets de R&I en cours et à venir. Sur ces trois axes de développement, le travail collaboratif entre instituts, la mise en commun de méthodes, données et résultats est indispensable, appelant ainsi au déploiement de projets ouverts multipartenaires bénéficiant d'une centralisation de la capitalisation et de la diffusion des résultats.

Exemple 7

Recommandations d'actions d'accompagnement et de gouvernance

L'ensemble des familles de solutions ont mis en évidence des besoins d'actions d'accompagnement et de gouvernance que l'on peut ici synthétiser en trois principales actions.

- La première viserait au montage de **groupements d'acteurs** (interprofession, fédération, association, ...) d'origines diverses (industriels, collectivités, chercheurs, citoyens, ...) en vue de **mutualiser les moyens** de recensement des puits naturels ainsi que d'étendre le déploiement des pratiques stockantes. Par ailleurs, de tels groupements permettraient d'identifier le positionnement des différentes catégories d'acteurs tout au long de la chaîne de valeur, identifier les modèles économiques envisageables ainsi que la répartition des coûts et bénéfices économiques et environnementaux.
- La **dissémination de l'information** sur les bénéfices et les risques associés aux différentes solutions puits de carbone auprès du grand public, des instances décisionnaires, des ONG, pourrait aussi être un rôle majeur de ce type de groupement. Parmi les besoins de communication importants on peut notamment relever (i) les niveaux de risques associés au stockage géologique du CO₂, (ii) les niveaux de risques associés à la réhabilitation des sols pollués, (iii) les modes de gestion et de valorisation vertueux du bois en forêt.
- Enfin, compte tenu des convergences potentielles des solutions entre pays limitrophes, notamment sur les conditions de stockages en milieux naturels ainsi que l'accès à de potentiels réservoirs géologiques partagés, des actions de **coordination de la recherche et de la réglementation internationale** paraissent nécessaires. Des réseaux comme celui de l'ECCSEL (European Research Infrastructure for CO₂ Capture, Utilisation, Transport and Storage) pourraient être étoffés. La réglementation en matière de durabilité de la mobilisation de la biomasse à vocation énergétique, matériaux et autres finalités de stockage pourrait être homogénéisée. Il pourrait en être de même pour le déploiement et la gestion des infrastructures de transport et stockage du CO₂.

D'une manière générale, des fonds publics et programmes de soutien spécifiques (nationaux et multinationaux) devront être déployés pour la mise en œuvre de chacune de ces solutions





Acronymes

ADEME : Agence De l'Écologie et de la Maitrise de l'Énergie
ACV : Analyse de Cycle de Vie
AMS : Avec Mesure Supplémentaires
BECCS : BioEnergy with Carbone Capture and Storage
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BO : Bois d'Œuvre
BTP : Bâtiment et Travaux Publics
CCU : Carbon Capture and Utilisation
CCUS : Carbon, Capture, utilisation and Storage
CCS : Carbon, Capture and Storage
CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
DAC : Direct Air capture
DACCS : Direct Air Carbon Capture and Storage
ECCSEL : European Research Infrastructure for CO2 Capture, Utilisation, Transport and Storage
EFESE : Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques
EIFER : European Institute for Energy Research
ENSIACET : École Nationale Supérieure des Ingénieurs en Arts Chimiques et Technologiques
EPF : Etablissement Public Foncier
GEPEA : GENie des Procédés Environnement - Agroalimentaire
GES : Gaz à Effet de Serre
ICBMS : Institut de Chimie et de Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires
IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IFPEN : IFP Energies Nouvelles
INP : Institut National Polytechnique
INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture l'alimentation et l'environnement
IPSL : Institut Pierre Simon Laplace
LIEC : Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux
LRGP : Laboratoire Réactions et Génie des Procédés
LSCE : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
MO : Matière Organique
Mt : Millions de tonnes
MTES : Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire
PCC : Precipitated Calcium Carbonate
PIA : Programme d'Investissements d'Avenir
PME : Petite et Moyenne Entreprise
REFIOM : Résidus d'Épuration des Fumées d'Incinération des Ordures Ménagères
SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone
TRL : Technical Readiness Level
UL : Université de Lorraine
ZEE : Zone Économique Exclusive

ADEME, 2021 :

Transition(s) 2050. Choisir Maintenant. Agir pour le climat. Rapport.

<https://librairie.ademe.fr/cadic/6531/transitions2050-rapport-comprime.pdf?modal=false>

ADEME Guyane, 2016 :

GES et Forêt, Méthodologie, bilan, analyse. LES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE LIEES A LA FORET EN GUYANE, GUYANE ENERGIE CLIMAT, 2016.

<https://guyane.ademe.fr/expertises/observatoires/observatoire-du-carbone>

EFESE, 2019 :

L'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques. Rapport de première phase – Du constat à l'action. Ministère de la Transition Ecologique.

https://ree.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/thema_-_la_sequestration_de_carbone_par_les_ecosysteme.pdf

INRAE, 2019 :

Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel cout ? Rapport scientifique de 'étude, décembre 2020.

<https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/Rapport%20Etude%204p1000.pdf>

Pacte Vert pour l'Europe du 14 juillet 2021 :

https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_fr

Pan, SY., Chen, YH., Fan, LS. et al. 2020 :

CO₂ mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction. Nat Sustain 3, 399–405 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0486-9>

SNBC, 2020 :

Stratégie Nationale Bas carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone. Ministère de la transition écologique, mars 2020.

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf



Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie

<https://www.allianceenergie.fr/>



Contact projet :
Daphné LORNE
(IFP Energies nouvelles)
daphne.lorne@ifpen.fr

Equipe d'animation projet :

Monique AXELOS (INRAE), Jack LEGRAND (CNRS – GEPEA), Guillaume BOISSONNET (CEA), Florence DELPRAT-JANNAUD (IFPEN)

Avec nos remerciements aux nombreux contributeurs de ce rapport (par ordre alphabétique) :

ARTERO Vincent (CEA) ; BAUSSET Jean (Bioeconomy for Change) ; BOURGEOIS Florent (Toulouse INP - LGC) ; DEFLANDRE Jean-Pierre (IFP School) ; DE MESQUITA LOBO VELOSO Fernanda (BRGM) ; DUFOUR Anthony (CNRS-UL-LRGP) ; FAURE-CATTELOIN Pierre (CNRS-UL-LIEC) ; FORTI Laurent (IFPEN) ; GRAVAUD Isaline (BRGM) ; JAMMES Laurent (CNRS-INSU) ; JIMENEZ Julie (INRAE) ; MARTINEZ Isabelle (IPGP) ; MASSOULARD Florent (stagiaire ANCRE) ; MOREL Jean-Louis (UL-INRAE-LSE) ; NIZOU Sylvain (CEA) ; PIRONON Jacques (CNRS-UL-GeoRessources) ; RABOT-QUERCI Marie-Laure (EIFER) ; RABOUILLE Christophe (LSCE-IPSL) ; RUFFINE Livio (IFREMER) ; SALLEE Noalwenn (IFPEN) ; SENANGE Max (stagiaire ANCRE) ; SOULET Guillaume (IFREMER) ; VIOVY Nicolas (LSCE-IPSL).

Direction artistique, conception graphique

Laetitia MARTIN
Laetmartin@gmail.com
06 09 61 77 43

Illustrations : Freepix.com (@macrovector)
récomposées par Laetitia MARTIN

Octobre 2022