

Country CDR readiness assessment

Potentiel de déploiement

des méthodes
d'élimination du
dioxyde de carbone
atmosphérique
en France

MARS 2024

Etude réalisée par : Avec le support analytique et méthodologique : Et la contribution de :

Carbon Gap



RMI

Remerciements

Les auteurs tiennent à exprimer leurs sincères remerciements à toutes les personnes qui ont accepté d'être interviewées dans le cadre de l'écriture de ce rapport. Leurs contributions ont entre autres permis d'améliorer la méthodologie mise en œuvre ainsi que les principaux résultats obtenus. Nos remerciements vont également aux chercheurs dont les travaux ont servi de base à l'établissement des différents gisements en ressource. Un grand merci à tous les relecteurs qui ont permis, par leurs apports d'affiner et d'enrichir le document.

Les auteurs remercient enfin la Grantham Foundation dont le soutien a permis la réalisation de cette étude.

Table des matières

Remerciements	2
Glossaire.....	4
1. Résumé aux décideurs.....	5
2. Introduction	8
3. Les méthodes d'élimination du dioxyde de carbone et leurs besoins en ressources	10
3.1. Diversité des méthodes d'EDC.....	10
3.2. Méthodes d'EDC retenues	17
3.3. Besoin en ressources des méthodes d'EDC retenues	18
4. Gisements de ressources nécessaires à la mise en œuvre des méthodes d'EDC	19
4.1. Electricité renouvelable	19
4.2. Chaleur fatale.....	22
4.3. Biomasse	23
4.4. Surfaces terrestres	26
4.5. Surfaces marines côtières	31
4.6. Surfaces sous-marines.....	32
4.7. Roches et minéraux silicatés et carbonatés.....	34
4.8. Stockage géologique de CO ₂	37
4.9. Transport de CO ₂	40
4.10. Vision globale du besoin en ressource	43
5. Cadre réglementaire et juridique concernant l'EDC.....	44
5.1. Introduction.....	44
5.2. Cadres juridiques pertinents	44
5.3. Rôle de l'EDC dans la politique nationale.....	46
5.4. Soutien à la R&D et à l'innovation.....	47
5.5. Les acteurs de l'EDC	49

6. Potentiel théorique maximal d'EDC	50
6.1. Méthodologie d'allocation des ressources pour les méthodes d'EDC	50
6.2. Potentiels théoriques maximaux d'EDC	53
7. Panorama socio-économique en France	54
7.1. Economie française	54
7.2. Paysage politique et opinion publique	60
7.3. Imaginaires et visions du monde	66
8. Potentiel pratique déployable d'EDC en France	69
8.1. Scénarios proposés	69
8.2. Résultats	72
8.3. Méthodologie	77
8.4. Estimation du coût pour la mise en œuvre des scénarios envisagés	92
8.5. Potentiel d'EDC en 2030	92
9. Conclusion	95
Disclaimer	98
Bibliographie	98
Liste des figures, tableaux et encadrés	104
10. Annexes	109
10.1. Réactions chimiques impliquées dans l'altération accélérée terrestre et l'alcalinisation minérale des océans	109
10.2. Annexe : Description des sources utilisées pour l'estimation du gisement en biomasse	110
10.3. Annexe : Critères utilisés par l'INRAE pour estimer le gisement en superficie des pratiques stockantes	115
10.4. Annexe : Conversion de la biomasse en énergie	117
10.5. Annexe : Facteurs limitants pour établir le scénario de référence	118
10.6. Annexe : Concept de correspondance entre origine des émissions résiduelles et permanence de l'EDC utilisée pour les compenser (like-for-like)	118
10.7. Annexe : Facteurs de conversion pour les pratiques stockantes de l'INRAE	120
10.8. Annexe : Allocation de l'électricité dans le scénario ambition	121
10.9. Annexe : Besoin en CO ₂ biogénique du maritime	121
10.10. Annexe : Volume de BECSC en 2050 dans le scénario ambition	122
10.11. Annexe : Coûts de capture pour les différentes méthodes d'EDC	123
A propos	124

Glossaire

BDD-BR : Base de données sur les besoins en ressources des méthodes d'EDC, fruit d'une collaboration entre RMI et Carbon Gap

BECS : Bioénergie avec capture et stockage de carbone (en anglais, Bioenergy with Carbon Capture and Storage, ou BECCS)

CIMSE : Cultures intermédiaires multiservices environnementaux

Citepa : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (CITEPA)

CKD : Ciment Kiln Dust (poussière de four de ciment)

CSC : Capture et stockage du carbone (sur les sites émetteurs) (en anglais, Carbon Capture and Storage, ou CCS)

DACCS : Acronyme pour l'anglais « direct air capture with carbon storage », soit capture directe dans l'air avec stockage du carbone en français. La plupart des publications en français utilisent l'acronyme anglais, nous ferons donc de même dans ce rapport.

EDC : Elimination du Dioxyde de Carbone, soit Carbon Dioxide Removal (CDR) en anglais

IPBES : Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

Mha : Millions d'hectare

L-DAC : Liquid Direct Air Capture

OAE : Ocean Alkalinity Enhancement (Alcalinisation des océans)

ONRB : Observatoire National des Ressources en Biomasse

MtMB : Million de tonnes de matière brute

MtMS : Million de tonnes de matière sèche

PPE : Programmation Pluriannuelle de l'Energie

S-DAC : Solid Direct Air Capture

SDES : Service des Données et Etudes Statistiques

SGPE : Secrétariat Général à la Planification Ecologique

SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone

SNMB : Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse

PRO : Produits résiduels organiques

1. Résumé aux décideurs

Pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris et stabiliser le climat à un niveau de réchauffement bien en deçà de deux degrés Celsius, la grande majorité des pays doit atteindre la neutralité climatique au plus tard d'ici 2050. En plus de réduire leurs émissions le plus rapidement possible, les pays doivent pour cela développer rapidement leurs capacités à éliminer du dioxyde de carbone (EDC) afin de contre balancer leurs émissions résiduelles, et préparer la phase nette négative qui permettra de limiter le niveau d'un dépassement éventuel du budget carbone.

Il reste cependant difficile aujourd'hui de savoir combien d'EDC chaque pays devrait déployer, quelles sont leurs capacités potentielles pour déployer de l'EDC sans interférer avec leurs efforts de réductions des émissions, et enfin comment s'y prendre pour réussir un déploiement rapide, juste et auquel la société civile adhère. Ces informations manquent aussi pour permettre une planification raisonnée de l'utilisation de l'EDC, et éviter les risques d'aléa moral dans le cas où certains pays seraient tentés de se reposer davantage sur un déploiement futur de l'EDC pour réduire la pression sur les réductions d'émissions à court terme (1).

Fournir des réponses

Ce rapport présente les résultats du projet **"Country CDR readiness assessment"** pour la France, conduit par Carbon Gap et dont l'objectif principal est de fournir de premiers éléments de réponse quantifiés aux questions mentionnées précédemment, afin d'aider les pays à s'emparer de l'EDC de façon ambitieuse et responsable. L'étude propose une analyse « bottom-up » des ressources disponibles en France pour estimer les potentiels théorique puis réalisable de déploiement des méthodes d'EDC en France. Parce que le déploiement de nouvelles filières comme l'EDC n'est pas une question seulement technique, l'étude se penche aussi sur la « géographie sociale » pour caractériser les perceptions des parties prenantes sur ce sujet, y compris du grand public. Elle est structurée autour des étapes suivantes :

1. Evaluation et sélection des **méthodes** d'EDC disponibles
2. Caractérisation des **besoins en ressource** des différentes méthodes d'EDC retenues
3. Evaluation des **gisements** théoriques maximaux disponibles pour chacune des ressources nécessaires aux méthodes d'EDC : électricité renouvelable, chaleur fatale, biomasse, capacité de stockage géologique du CO₂, etc.
4. Estimation du **potentiel théorique maximal**
5. **Diagnostic de l'environnement** réglementaire, économique et politique français
6. **Analyse des perceptions** sociétales de l'opportunité de déployer des capacités d'EDC en France.
7. Estimation du **potentiel d'EDC réalisable en France** à horizon 2050 avec un point de passage à 2030 selon trois scénarios.

Un potentiel important

Les différentes méthodes d'EDC, regroupées en (i) conversion de biomasse, (ii) gestion améliorée des écosystèmes, (iii) méthodes électrochimiques et (iv) méthodes géochimiques sont toutes passées en revue dans le rapport, et leurs potentiels théoriques respectifs sont évalués à partir du gisement en ressources disponibles. Cette évaluation « maximaliste » aboutit dans un premier temps à un potentiel théorique d'EDC d'environ 780 MtCO_{2eq}/an en France à l'horizon 2050. Ce potentiel représente un maximum théorique si toutes les ressources disponibles étaient fléchées vers l'EDC, inatteignable en pratique dans les conditions actuelles.

Trois scénarios réalisables

Des contraintes supplémentaires ainsi que des hypothèses plus conservatrices sur l'utilisation des ressources ont ensuite été appliquées pour identifier la part de ce potentiel théorique qui serait réalisable dans des conditions proches de l'actuel. Trois scénarios ont alors été construits et comparés au niveau d'émissions résiduelles anticipé par la SNBC2, soit 80 MtCO_{2eq} résiduelles dont ~30 MtCO_{2eq} d'origine fossile et ~50 MtCO_{2eq} d'origine biogénique. Par ailleurs, l'hypothèse d'un déploiement de la capture avec stockage du carbone (CSC) à hauteur de 10 Mt CO_{2eq}/an pour intercepter une partie de ces émissions résiduelles permet de déduire que les puits naturels et l'EDC devront compenser environ 70 Mt CO_{2eq}/an pour que la France respecte son objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050. Cette hypothèse sert de valeur cible dans la construction des scénarios pour le déploiement de l'EDC en France.

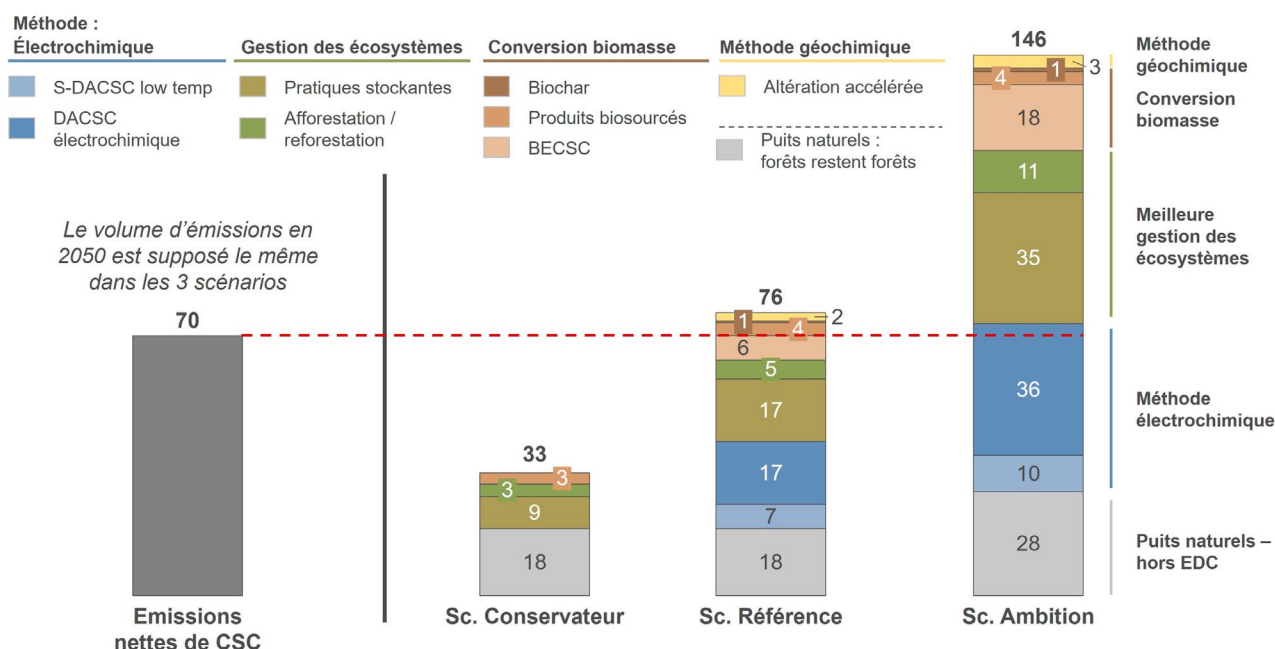


Figure R1 – Composition du puits de carbone total des scénarios conservateur, référence et ambition en 2050, comparé au volume d'émissions résiduelles anticipé par la SNBC 2, en $\text{MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$

Dans le scénario de **'référence'**, la France diversifie proactivement ses puits de carbone et atteint une capacité d'EDC de $76 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$, légèrement au-dessus de la cible, ce qui fournit une marge de sécurité. Ce scénario de référence fait appel à l'ensemble de la palette des méthodes d'EDC disponibles. La capture directe dans l'air avec stockage du carbone (DACCS) et les pratiques stockantes sont les deux méthodes d'EDC qui permettent d'éliminer le plus de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ en complément des puits naturels (forêts restant forêts). La bioénergie avec capture et stockage du carbone (BECS) est également sollicitée mais le CO_2 biogénique capturé est en grande partie fléché vers une utilisation pour la production d'électro-carburants et non pour un stockage géologique limitant ainsi potentiel d'EDC pour cette méthode. Le scénario de référence requiert une capacité de stockage géologique de CO_2 de $40 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$.

Le scénario **'ambition'** décrit une trajectoire où la France s'engage plus vite et plus fortement sur l'EDC, ce qui lui permet d'exploiter d'avantage le potentiel réalisable, et d'atteindre des capacités d'EDC de près de $146 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}$ tous les ans à l'horizon 2050. Ce scénario permet à la France soit de dépasser ses objectifs en termes de décarbonation et donc de devenir nette négative avant 2050, soit de compenser un niveau d'émissions résiduelles plus élevé que prévu, en lien avec un retard de la trajectoire adoptée par la France. Pour atteindre ces volumes d'EDC plus élevés, il faut débloquer plus de capacité de stockage géologique de CO_2 qui s'élève dans ce scénario à $\sim 75 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$. Par ailleurs, les gisements de ressource exploités par les différentes méthodes d'EDC sont plus conséquents, notamment pour l'électricité renouvelable qui voit son gisement utilisé passer d'environ 20 TWh à près de 30 TWh. Le BECS est également bien plus sollicité dans le scénario ambition et contribue à hauteur de 18 Mt CO_2 éliminées chaque année contre seulement 6 Mt CO_2 dans le scénario de référence.

Le troisième scénario, dénommé **'conservateur'** décrit quant à lui le statu quo, un scénario où la France investit moins et plus tardivement dans l'EDC, avec des hypothèses d'adhésion publique et de maîtrise technique de certaines technologies EDC plus faibles. Le gisement d'électricité renouvelable à destination de l'EDC n'est pas disponible, la France ayant pris trop de retard pour décarboner sa production et satisfaire les besoins en électricité renouvelable des autres secteurs d'activité. Les capacités de stockage géologique restent limitées et permettent seulement de répondre au besoin de la CSC. Dans ce scénario, la totalité des puits de carbone dont dispose la France sont de faible permanence et ne permettent pas d'atteindre la neutralité carbone. Près de $45 \text{ Mt CO}_{2\text{eq}}$ seraient émises chaque année en 2050.

Neutralité carbone durable atteinte

En diversifiant les méthodes d'EDC déployées, les scénarios de référence et ambition permettent d'atteindre la neutralité carbone. La France pourrait même la dépasser, et donc devenir nette négative, avant 2050 si dans le même temps, la trajectoire de décarbonation officielle était tenue. Ces scénarios permettent même d'atteindre la neutralité carbone « durable », un état où les émissions résiduelles sont compensées par de l'EDC en respectant le principe de correspondance entre origine des émissions résiduelles et niveau de permanence de la méthode d'EDC employée (like for like en anglais).

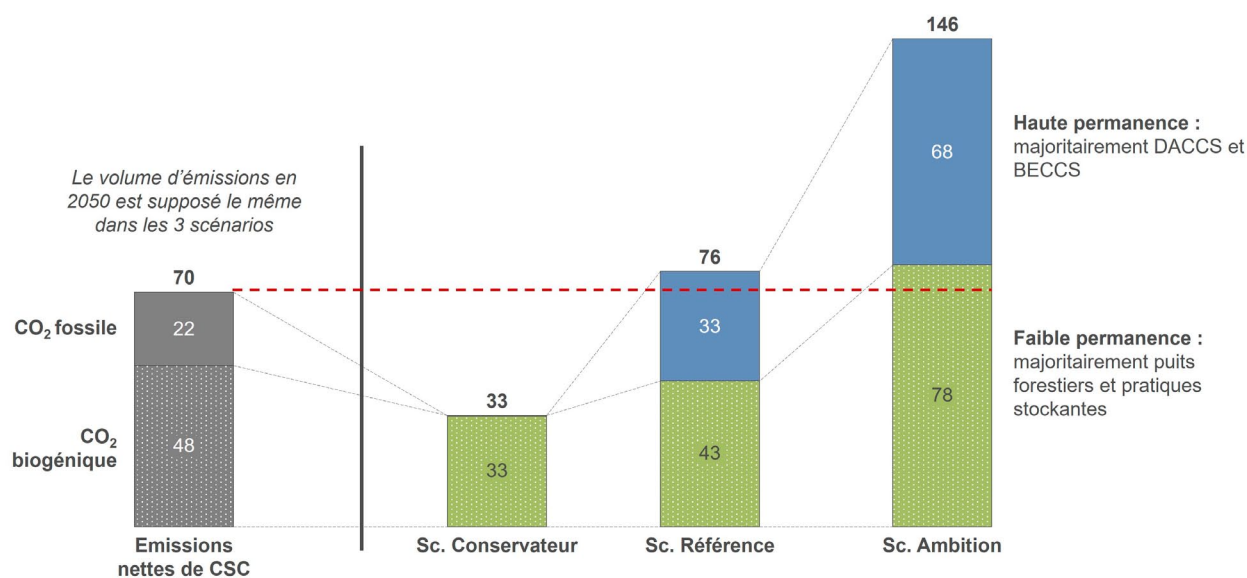


Figure R2 – Comparaison de l'origine des émissions résiduelles avec la permanence des puits de carbone mobilisés dans les trois scénarios considérés, en MtCO_{2eq}/an

Approche portefeuille

Les scénarios de déploiement proposés mobilisent la diversité des méthodes d'EDC. Néanmoins, l'étude montre clairement que la disponibilité de capacités de stockage géologique du CO₂, la disponibilité d'énergie décarbonée supplémentaire et le niveau de rémunération des pratiques stockantes sont les principaux verrous à lever pour réussir un déploiement à l'échelle.

Des politiques volontaristes et coordonnées sont nécessaires pour lever ces verrous et construire un environnement réglementaire qui donne les garanties nécessaires sur l'utilisation responsable de l'EDC. Etant donnée la diversité de méthodes et les multiples dépendances à des secteurs connexes (comme l'énergie), il semble important de construire une véritable stratégie française de l'EDC qui permettrait à la France de respecter ses engagements climatiques tout en bénéficiant du développement choisi et organisé de nouvelles filières dans les territoires.

2. Introduction

Alors que le changement climatique s'accélère, causant de plus en plus de dégâts, de nombreux gouvernements et acteurs privés se sont engagés à atteindre la neutralité carbone d'ici la moitié du siècle. Ils doivent donc réduire leurs émissions au maximum et le plus rapidement possible, mais également **planifier des capacités d'élimination du dioxyde de carbone (EDC) suffisantes pour compenser leurs émissions résiduelles**.

L'élimination du carbone (carbon dioxide removal, CDR en anglais) désigne un « ensemble d'activités humaines visant à **retirer du CO₂ de l'atmosphère et à le stocker durablement** dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques, ou dans des produits » (2). Ces activités permettent de générer des « **émissions négatives** » et sont considérées comme le troisième pilier de l'action climatique : réduire, s'adapter, éliminer.

L'EDC se différencie de deux autres familles de méthodes de gestion du carbone, plus connues : la capture et stockage du carbone (CSC, ou CCS en anglais), et la capture et valorisation du carbone (CVC, ou CCU en anglais). En effet, ces dernières permettent de réduire les émissions de sites très émetteurs et de recycler le CO₂, mais ne génèrent pas d'émissions négatives. Pour plus de détails sur cette distinction importante, consulter (3).

Dans son rapport du sixième cycle d'évaluation, le GIEC prévoit la nécessité d'éliminer plusieurs centaines de milliards de tonnes de dioxyde de carbone d'ici la fin du siècle, dans le but de stabiliser le changement climatique à des niveaux conformes aux ambitions de l'Accord de Paris. Des rapports récents continuent de confirmer la nécessité de déployer des capacités d'EDC à grande échelle avant le milieu du siècle (4; 5).

Pourtant, aucun gouvernement ne dispose actuellement d'une stratégie robuste pour développer et déployer l'élimination du dioxyde de carbone à l'échelle suggérée par le GIEC. De nombreuses raisons expliquent cette situation, en particulier **le manque de clarté pour les gouvernements quant aux volumes de CO₂ que leur pays devrait éliminer (objectifs), sur les capacités d'EDC qu'il est possible de déployer (potentiel), et comment les déployer (moyens)**.

En effet, la plupart des estimations des volumes de dioxyde de carbone qu'il est nécessaire d'éliminer sont données à l'échelle mondiale et les données manquent pour déterminer ce qui est réalisable au niveau de chaque pays. Les estimations actuelles de la quantité d'EDC pouvant être déployée sont par ailleurs souvent basées sur des modélisations (6), ne se concentrant que sur quelques méthodes d'EDC à la fois (7), et n'explorant donc pas les situations de concurrence pour les ressources et les problématiques de bouclage (8). Ces estimations sont aussi largement techniques et ne tiennent que peu voire pas compte des aspects sociaux tels que les connaissances et le niveau d'adhésion du public (9), non seulement cruciale pour déterminer la quantité d'EDC qui pourrait être déployée, mais aussi variable d'un pays à l'autre.

Pour élaborer un plan réaliste et accélérer le déploiement des techniques d'élimination du dioxyde de carbone, il est nécessaire d'entreprendre une évaluation détaillée des ressources existantes et de leur niveau de disponibilité à l'échelle d'un pays, et de consulter les acteurs clés et le public dans chaque pays considéré.

Pour combler ce manque d'information et aider les pays à accélérer le déploiement de l'EDC, **Carbon Gap conduit le projet "Country CDR readiness assessment"** (évaluation du potentiel d'EDC des pays). Inspiré des Renewables Readiness Assessments (10) publiés par l'Agence Internationale des Energies Renouvelables, ce projet vise à estimer le potentiel de déploiement de l'EDC au niveau national, et à co-créer des feuilles de route spécifiques à chaque pays. Ces feuilles de route cherchent à décrire en détail ce qui est nécessaire pour réussir le déploiement de l'EDC à une échelle significative et sont rédigées avec la participation active des acteurs nationaux de chaque pays, afin d'aider les décideurs à identifier les opportunités existantes et les actions à entreprendre pour les concrétiser.

Ce rapport présente une estimation « bottom-up » du potentiel d'EDC en France et propose un portefeuille optimal de méthodes d'EDC à déployer.

Le rapport commence par un **panorama des méthodes existantes d'EDC**, en expliquant leur fonctionnement, et pourquoi certaines ont été écartées de cette étude. Pour les méthodes retenues, on regarde ensuite leurs besoins en ressources pour fonctionner et produire des émissions négatives (énergie, eau, terre, stockage...). Les données sur ces besoins ont été compilées dans une base de données dont la méthode de construction et les résultats sont présentés.

Le rapport se penche ensuite sur **la disponibilité des différentes ressources nécessaires**, en évaluant les gisements existants tout en prenant en compte les volumes contraints et les usages prioritaires. Au-delà de la photo à l'instant t d'un gisement, on analyse également les tendances possibles sur les gisements, notamment pour évaluer si des volumes supplémentaires peuvent être dégagés sans compromettre les usages existants.

Pour compléter cette première partie du rapport, **l'environnement réglementaire actuel est analysé** pour identifier les éléments favorables et les freins au développement des filières d'EDC.

En combinant les volumes maximaux théoriquement disponibles de ressources avec les besoins par méthodes, et dans les limites du cadre réglementaire, on obtient **une estimation du potentiel maximal théorique de la France pour déployer des émissions négatives**. Ce résultat hautement théorique vient clore la première partie du rapport.

Dans la deuxième partie du rapport, l'objectif est d'affiner les hypothèses de travail pour produire une estimation du potentiel réalisable. A partir de données publiées, le rapport dresse un panorama de la structure de l'économie française, de son paysage politique et des attitudes vis-à-vis de la problématique du changement climatique, ainsi que des caractéristiques documentées de la société française. Les informations collectées lors d'un panel citoyen tenu à Rennes en novembre 2023, ainsi que lors de plus d'une quinzaine d'interviews ciblées menées auprès de parties prenantes stratégiques au développement de l'EDC sont également décrites afin de compléter cette analyse de **la « géographie sociale » de la France sur la question de l'EDC**.

Enfin les hypothèses de disponibilité des gisements en ressources sont révisées pour prendre en compte les éléments documentés dans cette deuxième partie et permettre de quantifier **le potentiel réalisable** sur la base des éléments connus aujourd'hui. Cela permet de construire **trois scénarios atteignables** sans modifier profondément les conditions actuelles, **reflétant différents niveaux d'ambition**.

Ce rapport a servi de base d'information pour élaborer **une feuille de route des actions requises pour accélérer le déploiement de l'EDC en France**, qui a été conçue conjointement par l'équipe du projet et un échantillon d'acteurs clés en France. La feuille de route est publiée dans un document séparé.

Ce rapport a été préparé par une équipe d'**E-CUBE** en collaboration avec l'équipe de **Carbon Gap** et l'appui de la CDR initiative de **RMI**, dans le cadre du projet "Country CDR readiness assessment" qui est coordonné par Carbon Gap et financé par la **Grantham Foundation**.



3. Les méthodes d'élimination du dioxyde de carbone et leurs besoins en ressources

3.1. Diversité des méthodes d'EDC

Il existe une grande diversité de méthodes d'EDC que l'on peut classer en quatre catégories : (1) les méthodes de conversion de la biomasse et (2) les méthodes de gestion améliorée des écosystèmes reposent sur le processus naturel de photosynthèse pour extraire le CO_2 de l'atmosphère. (3) les méthodes électro-chimiques reposent sur l'utilisation des matières synthétiques dans des processus industrialisés pour traiter de grands volumes d'air et en extraire de façon sélective le CO_2 . Enfin, (4) Les méthodes géochimiques sont basées sur les réactions naturelles entre les gaz, l'eau et les roches à la surface terrestre.

La France dispose de nombreuses richesses écosystémiques, géologiques, maritimes et énergétiques décarbonées. Cette diversité de ressources donne potentiellement accès à l'ensemble des méthodes d'EDC.



© Shutterstock

3.1.1. Méthodes de conversion de la biomasse

Cette famille de méthodes repose sur la capacité naturelle des plantes à capturer du CO_2 atmosphérique par photosynthèse et le stocker dans leur biomasse. Le carbone ainsi stocké fait partie du cycle court du carbone (11), et est normalement rapidement remobilisé le long de chaînes trophiques avant de rejoindre de nouveau l'atmosphère quand la biomasse est dégradée. Le défi consiste donc soit à extraire le carbone contenu dans la biomasse pour le stocker, soit à stabiliser la biomasse pour empêcher son processus de dégradation.

La bioénergie avec capture et stockage du carbone (BECCS) couvre dans ce rapport deux approches d'extraction du carbone de la biomasse : la combustion et la fermentation (ou digestion anaérobie).

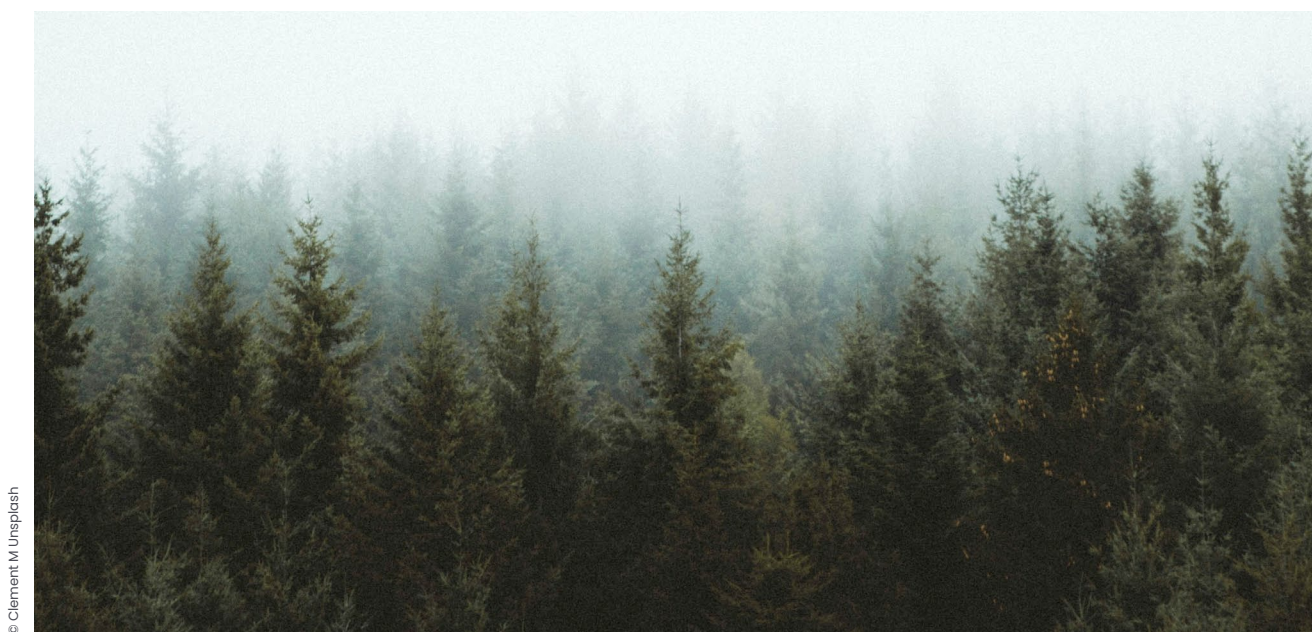
La **combustion** permet, en plus de produire de l'énergie, d'obtenir des fumées relativement concentrées en CO_2 (typiquement de 10 à 16%vol) qui peuvent être traitées par un processus de CSC pour en récupérer le CO_2 qui peut ensuite être stocké. De nombreuses centrales, chaudières, ou fours brûlent aujourd'hui déjà de la biomasse pour sa chaleur, mais sans intercepter le CO_2 en sortie de process. En ajoutant un module de capture, ces sites pourraient être rapidement convertis de sources à puits, ce qui représente en Europe un gisement d'EDC d'environ 200 MtCO_2/an (7).

La **fermentation** est une autre voie d'extraction du carbone de la biomasse par digestion microbienne. Le biogaz produit est un mélange de méthane, de CO_2 et d'eau qu'il est possible de purifier pour séparer les trois gaz. Aujourd'hui, certains méthaniseurs agricoles ou même des unités de traitement des eaux usées réalisent déjà ce processus pour pouvoir réinjecter le méthane sur le réseau de gaz naturel. Le CO_2 pur est pour sa part rejeté dans l'atmosphère, mais pourrait être liquéfié pour le transporter et le stocker.

Pour **stabiliser la biomasse**, une première approche consiste à la valoriser dans des produit biosourcés à longue durée de vie, principalement le bois d'œuvre. Puisque les arbres ont accumulé du carbone de l'atmosphère pendant leur croissance, utiliser des produits bois permet de conserver ce carbone et d'éviter qu'il soit réémis lors de la mort et de la décomposition de l'arbre. Les maisons en bois sont un exemple de puits de carbone associé à cette méthode d'EDC.

Il est également possible d'enfouir la biomasse pour la soustraire aux agents biologiques et chimiques responsables de sa dégradation en surface. Une des méthodes consiste à cultiver des algues puis à les enfouir, au fond de l'océan, à des profondeurs suffisantes pour garantir la stabilité de la biomasse, ou à les sécher puis les stocker dans des cavités naturelles ou créées à cet effet.

Enfin, le processus de pyrolyse (combustion sans oxygène) permet de convertir la biomasse en **biochar et/ou bio-huile**. La pyrolyse a pour effet de recombinaison les atomes de carbone en molécules plus stables, ce qui rend le biochar inerte et en fait donc un stockage de carbone durable. Le biochar peut être stocké, épandu sur les sols auxquels il confère des propriétés améliorées de rétention d'eau et de nutriments notamment ou utilisé dans l'industrie comme matériau de construction. De façon générale, l'utilisation de biochar induit de nombreux co-bénéfices qui ne sont que très partiellement détaillés dans ce rapport. Par exemple, dans le cas des sols agricoles ou forestiers, il permet de stimuler la vie des sols, ce qui peut augmenter la production de biomasse des végétaux présents en surface. De cette manière, le biochar peut potentiellement former une boucle de rétroaction positive : augmenter la croissance de la biomasse et accroître davantage la séquestration du carbone.



© Clement M Unsplash

3.1.2. Méthodes de gestion améliorée des écosystèmes

Les écosystèmes échangent et stockent naturellement du carbone au sein du cycle court. En fonction de leur état ils peuvent capter plus de carbone qu'ils n'en émettent et agir comme puits de carbone, ou l'inverse et représenter une source d'émissions. Certains écosystèmes sont aussi plus riches en carbone que d'autres. C'est notamment le cas des tourbières et des mangroves.

Pour que des écosystèmes séquestrent du carbone et génèrent des émissions négatives, l'homme peut mettre en œuvre une gestion améliorée afin de maintenir ces écosystèmes en conditions optimales (on parle de pratiques stockantes), voire augmenter la surface de ces écosystèmes par changement d'occupation des sols.

Pratiques stockantes

Selon les écosystèmes, différentes stratégies peuvent être adoptées pour préserver ou augmenter leurs capacités naturelles d'élimination du dioxyde de carbone.

Pratiques stockantes en forêt

Les pratiques stockantes forestières touchent à la récolte de la biomasse et à la gestion du couvert forestier. Dans le détail, les pratiques stockantes liées à la récolte de biomasse sont :

- Arrêter/éviter de récolter la biomasse des forêts comme les souches et les houppiers (branches, brandilles)
- Réaliser des éclaircies (coupes) avec un taux inférieur à 35% (12).

La première pratique vise à laisser le plus possible de biomasse se décomposer en forêt afin de stimuler le stockage de carbone dans les sols forestiers. La seconde consiste à éviter de couper tous les arbres d'une forêt au même moment. En effet, il est préférable de ne couper qu'une partie des arbres (moins de 35%) d'un même peuplement pour éviter de trop perturber les sols et d'engendrer ainsi un déstockage de carbone.

Les pratiques stockantes liées à la gestion du couvert forestier consistent à :

- Privilégier la régénération naturelle d'un peuplement par rapport à la plantation
- Réduire la préparation mécanisée (labour, tranchées) lors de la plantation de nouveaux arbres et la régénération assistée d'un peuplement forestier
- Augmenter la densité d'arbres du peuplement
- Accroître la diversité du peuplement
- Privilégier les espèces d'arbres qui stockent le plus de carbone
- Privilégier le renouvellement des arbres par la méthode « futaie » au lieu du « taillis »
- Privilégier les forêts avec plusieurs classes d'âge
- Augmenter la durée entre la régénération du peuplement forestier et la coupe finale
- Ajouter des engrais azotés aux sols forestiers

Pratiques stockantes agricoles

La conduite agronomique de différentes cultures peut être améliorée pour favoriser le stockage de carbone dans les sols. Six pratiques **stockantes agricoles** sont distinguées par l'INRAE pour leur potentiel de capture de carbone et pour la qualité de la littérature à leur sujet :

1. Le développement de **l'agroforesterie** dans les parcelles cultivées consiste à associer des arbres avec les cultures ou pâturages pour augmenter la capacité de capture et stockage de carbone par hectare.
2. L'introduction de **prairies temporaires** dans les rotations de grandes cultures ou l'allongement de la durée en prairie dans les rotations qui en comportent déjà.
3. L'extension des **cultures intermédiaires** consiste à insérer davantage de cultures intermédiaires entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture principale suivante, ou à allonger la durée des cultures intermédiaires lorsqu'elles sont déjà mises en œuvre par les agriculteurs.
4. Le passage au **semis direct et l'abandon du labour** consiste à semer directement dans les résidus de la culture précédente, sans travail du sol préalable (absence de labour).
5. L'épandage de nouvelles **ressources organiques** auparavant non épandues sur des sols agricoles
6. La **plantation de haie** aux bords des champs afin d'augmenter la quantité d'arbres et d'arbustes capable de séquestrer du carbone.

Pour plus de détails sur ces pratiques, voir les annexes 10.3 de l'étude INRAE (12).

Pratiques stockantes viticoles

La principale pratique stockante est l'**enherbement des vignobles**. Elle consiste à implanter des surfaces herbacées entre les rangs des vignes. Cet enherbement peut être permanent ou présent seulement l'hiver. L'enherbement est pratiqué depuis longtemps dans l'ensemble des domaines viticoles français. Il ne s'agit pourtant pas d'une obligation réglementaire. Les viticulteurs maîtrisent cette pratique qui leur permet de lutter contre les adventices, d'améliorer le fonctionnement biologique des sols, d'augmenter la quantité de matières organiques dans les sols, et de diminuer l'érosion.

Pratiques stockantes en prairies

La première pratique consiste à **remplacer de la fauche par du pâturage** pour augmenter le prélèvement et stimuler les prairies. L'augmentation du nombre de jours de pâturage améliore l'état du couvert de la prairie, elle permet le retour de matière organique au sol via les restitutions animales et elle améliore la structure et la chimie du sol ainsi que l'activité des enzymes et des communautés de micro-organismes du sol, essentielle dans le processus de stockage de carbone dans les sols.

La seconde pratique consiste à **augmenter modérément la fertilisation minérale azotée** des prairies permanentes (+50 kgN/ha/an), surtout pour les prairies permanentes qui n'en utilisent pas aujourd'hui. Cela permet de stimuler la reprise de végétation des prairies après l'hiver ou après une récolte passée afin d'augmenter la production d'herbe. Cette augmentation accroît les retours de carbone organique au sol, ce qui améliore les émissions négatives de CO₂ générées par les prairies permanentes. Il est toutefois important de noter que la fabrication d'engrais azotés se fait aujourd'hui en fabriquant de l'hydrogène par vaporeformage du gaz naturel (fossile), qui est utilisé dans la fabrication d'ammoniac NH₃, finalement transformé en engrais azotés diverses. De plus, la décomposition de ces engrais azotés dans les champs libère du N₂O, un gaz à effet de serre puissant (pouvoir de réchauffement global de 310) (13). Le dosage doit donc être optimal pour minimiser les pertes.

Pratiques stockantes des tourbières

Les **pratiques stockantes des tourbières** consistent à restaurer des tourbières endommagées par le passé et à préserver les tourbières françaises en bon état. La restauration des tourbières consiste généralement à remettre en eau la tourbière endommagée, par la suppression des drains et par la construction de « digues de tourbe ». Le drainage artificiel des tourbières pour l'agriculture, la sylviculture ou pour assainir ces milieux ont en effet fortement dégradé les tourbières en aérant les sols et en augmentant la décomposition de la matière organique, ce qui a entraîné des émissions de carbone dans l'atmosphère.

Pratiques stockantes des mangroves et des herbiers marins

Les **pratiques stockantes des mangroves et des herbiers marins** sont souvent regroupées dans l'appellation « Carbone bleu ». Elles consistent principalement à protéger ces écosystèmes naturels pour freiner leur dégradation voire leur permettre de se régénérer.

Changement d'occupation des sols

En complément d'une gestion améliorée des milieux existants, il est possible d'envisager la conversion de surfaces pour augmenter la superficie des écosystèmes riches en carbone.

En milieu terrestre, l'augmentation des surfaces de forêts permet une augmentation du puits de carbone naturel car les forêts stockent le carbone dans les sols et via la biomasse contenue dans les arbres vivants (troncs, branches et feuillages) et le bois mort, et permettent la production de produits bois dans lesquels est également stocké en fine du carbone. On parle d'afforestation (ou boisement) lorsque l'on plante des arbres là où il n'y en avait pas, et de reforestation (ou reboisement) lorsque l'on restaure des peuplements dans des zones où les arbres avaient été abattus ou dégradés. Il convient de ne pas confondre la séquestration de CO₂ (flux de carbone annuel en kgC/ha/an) des écosystèmes forestiers, et le stock total de carbone d'une forêt (tC/ha).

Les **tourbières** sont des zones humides particulières qui, selon le Service des Données et Etudes Statistiques du gouvernement (SDES), « *stockent plus du double de carbone que toutes les forêts de la planète [...] bien qu'elles ne couvrent aujourd'hui que 3% de la surface de la Terre* » (14). Dans leurs sols continuellement gorgés d'eau, les matières organiques issues des plantes ne se décomposent que partiellement et le carbone s'accumule sur le long terme. Une augmentation de la surface des tourbières pourrait permettre de stocker davantage de carbone. Néanmoins, les endroits propices aux tourbières sont rares et le potentiel est donc limité.

Concernant les milieux marins, les **mangroves** sont des écosystèmes côtiers uniques qui stockent du CO_2 de l'air grâce à la photosynthèse. Les palétuviers absorbent le CO_2 de l'air et le transforment en carbone organique, qu'ils utilisent pour leur croissance et leur développement. La reconstruction de mangroves endommagées ou détruites par le passé pourrait induire une hausse de l'élimination du CO_2 .

Les **herbiers marins** sont des prairies sous-marines d'herbes aquatiques qui se développent dans des eaux peu profondes le long des côtes. Ces écosystèmes marins agissent comme puits de carbone en capturant le dioxyde de carbone de l'atmosphère via la photosynthèse et en le stockant sous forme de matière organique dans les tissus végétaux et les racines des herbiers. Malheureusement, tout comme les mangroves, les herbiers marins sont confrontés à des menaces croissantes telles que la pollution, le développement côtier et le changement climatique lui-même. Des mesures pour accroître les superficies d'herbiers marins permettraient d'augmenter les puits de carbone naturels.

La fertilisation des océans avec du fer est un autre concept qui a été étudié dans les années 2000. L'idée est d'épandre de la poudre de fer fine dans des zones spécifiques des océans où cet élément est le facteur limitant de la croissance des phytoplanctons afin d'augmenter l'activité photosynthétique et donc la consommation de CO_2 atmosphérique. Les expérimentations de grande échelle qui ont été conduites ont cependant donné des résultats mitigés, l'explosion de croissance des phytoplanctons provoquant une déstabilisation majeure des écosystèmes localement et une grande partie du carbone capté étant relargué rapidement avec la dégradation de la biomasse produite.



© Jonathan Larson Unsplash

3.1.3. Méthodes géochimiques

Des réactions géochimiques spontanées entre l'atmosphère, les roches et l'eau permettent, dans le cycle naturel du carbone, le stockage long terme de carbone dans la croûte terrestre et dans les océans. Cette famille de méthodes d'EDC exploite ces processus naturels relativement lents en cherchant à les accélérer. On y trouve l'altération accélérée terrestre (« Enhanced weathering (EW) » en anglais), les méthodes d'élimination du carbone par l'océan, comme l'alcalinisation des océans, et les pompes artificielles de surface/profondeur.

L'altération accélérée terrestre (également connue sous le nom d'altération forcée) est une approche d'EDC qui vise à accélérer la dissolution naturelle des roches alcalines riches en calcium, magnésium et fer par l'acide carbonique généré par la dissolution du CO₂ atmosphérique dans l'eau de pluie. La dissolution de ces roches a pour effet de libérer des cations et de convertir l'acide carbonique en ions bicarbonates. In fine, ces espèces chimiques en solution migrent par jusqu'aux océans par le réseau fluvial et stimulent le processus naturel de minéralisation par lequel le CO₂ initialement dissout dans l'eau de pluie se retrouve séquestré dans des minéraux carbonatés. Quelques exemples de réaction d'altération sont présentés ci-dessous pour les minéraux les plus réactifs (Figure 1):

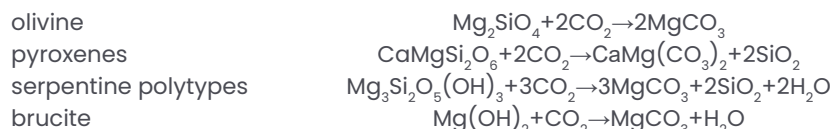
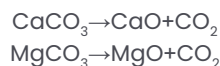


Figure 1 – Réactions de minéralisation provoquées par la dissolution de certains minéraux silicatés (National Academies of Sciences 2019)

Pour accélérer la cinétique de ces réactions, il convient d'augmenter la surface spécifique de contact entre ces roches et le milieu réactif (air ou eau). Pour cela, les roches peuvent être broyées jusqu'à atteindre une granulométrie comprise entre 1 µm et 100 µm (15) mais cela requiert de l'énergie.

Les roches carbonatées sont un cas particulier. La chaux et l'oxyde de magnésium, qui sont utilisés comme amendements agricoles réagissent spontanément avec le CO₂ ambiant pour reformer de la calcite ou magnésite, et ont donc la capacité d'éliminer du CO₂ atmosphérique. Cependant, ils sont produits par calcination de calcite ou magnésite, réaction qui libère un CO₂ fossile, selon les réactions :

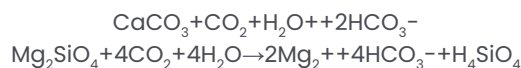


Pour que le processus soit net négatif, il faudrait donc capter le CO₂ fossile libéré lors de la calcination en utilisant des modules de CSC et stocker ce CO₂ en réservoirs géologiques, puis laisser la chaux et l'oxyde de magnésium minéraliser du CO₂ ambiant.

Différentes variantes de cette méthode existent selon que les roches broyées sont épandues à terre (par exemple sur des surfaces agricoles), ou le long des côtes pour profiter du concassage naturel que permet la houle marine.

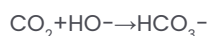
L'alcalinisation des océans est une seconde approche qui vise à augmenter la capacité des océans à stocker du CO₂ sont forme dissoute. L'alcalinité peut être comprise comme la capacité d'une solution (ici l'eau des océans) à neutraliser un acide. Le CO₂ dissout dans l'eau donne de l'acide carbonique, qui est donc responsable de l'acidification des océans. En augmentant artificiellement l'alcalinité des océans, on peut contrer ce phénomène et augmenter les quantités de CO₂ absorbées par les océans.

L'alcalinisation des océans par **voie minérale** consiste à disperser dans l'océan de la poudre fine de roches alcalines. En se dissolvant, elles vont neutraliser l'acide carbonique en ions bicarbonate et augmenter l'alcalinité de l'eau de mer. En conséquence, un échange de CO₂ de l'atmosphère vers l'océan s'opère pour rééquilibrer les pressions partielles de CO₂ à l'interface océan/atmosphère. Le CO₂ de l'atmosphère se retrouve alors in fine piégé sous forme d'ion bicarbonate HCO₃⁻ dans l'océan de manière stable. Les principales équations de dissolution impliquées dans l'alcalinisation des océans sont les suivantes :



Cette approche souffre néanmoins d'une cinétique lente du fait du pH légèrement basique de l'océan.

L'alcalinisation des océans par **voie électro-chimique** consiste à séparer par voie électrochimique les phases acides et basiques de l'eau de mer, retirer une partie de la phase acide qui doit ensuite être neutralisée, puis recomposer l'eau de mer avec une composition identique à l'eau prélevée, mais avec une alcalinité augmentée. L'augmentation de l'alcalinité permet d'absorber du CO₂ selon la réaction suivante :



La pompe artificielle de surface/profondeur est appelée « artificial upwelling & downwelling » en anglais . Elle désigne deux solutions : le « upwelling » et le « downwelling ».

Le « *upwelling* » consiste à utiliser des tuyaux ou d'autres méthodes pour pomper l'eau des profondeurs de l'océan, riche en nutriments, jusqu'à la surface où elle a un effet fertilisant et stimule la croissance des phytoplanctons, qui consomme du CO₂ lors de leur croissance. Le « *downwelling* » consiste à réaliser le flux inverse, c'est-à-dire transférer de l'eau de surface riche en carbone vers les profondeurs pour favoriser le transfert physique de l'atmosphère vers l'océan (2).



© Shutterstock

3.1.4. Méthodes électro-chimiques

Cette dernière famille de méthodes est basée sur des processus synthétiques par lesquels il est possible d'extraire de façon sélective du CO₂ directement de l'air ou de l'eau.

La capture directe du CO₂ de l'air, appelée « Direct Air Capture (DAC) » ou « Direct Air Capture with Carbon Capture and Storage (DACCS) » en anglais, désigne les processus industriels qui permettent d'absorber le CO₂ de l'atmosphère. Le CO₂ peut ensuite être stocké sous terre dans des réservoirs géologiques. Les principales technologies actuelles de capture du CO₂ utilisent des sorbants solides synthétiques (S-DAC, nécessitant pour régénérer le sorbant de la chaleur entre 80°C et 100°C), ou des solvants liquides (L-DAC, nécessitant pour résorber le solvant de la chaleur haute température 300 - 900 °C). D'autres technologies émergent (TRL 6) comme la DACCS électrochimique qui ne nécessitent pas de chaleur pour fonctionner (16).

La capture directe du CO₂ de l'océan désigne l'extraction du CO₂ de l'eau de mer (avec stockage). Elle peut être réalisée en appliquant un vide au-dessus de l'eau de mer. L'élimination du CO₂ de la surface de l'océan entraîne une sous-saturation de l'eau, forçant ainsi le CO₂ présent dans l'atmosphère à se dissoudre dans l'océan pour rétablir l'équilibre. Elle peut également être réalisée en acidifiant temporairement l'eau de mer avec un acide minéral, ou par électrodialyse et électrolyse, pour convertir les ions bicarbonate (HCO₃⁻) en CO₂ (2) et forcer ainsi son dégazage.

3.2. Méthodes d'EDC retenues

Il existe de nombreuses méthodes d'EDC et toutes n'en sont pas au même stade de développement. Alors que beaucoup en sont encore à des niveaux de maturité faibles, et doivent donc encore faire leurs preuves, d'autres, comme la fertilisation des océans au fer, n'ont pas démontré de performances satisfaisantes, et ont été mises de côté. Dans cette étude, le choix méthodologique a été de prendre en compte toutes les méthodes à même de se développer dans un futur proche. Le TRL sont évidemment une indication précieuse. Cependant, certaines méthodes comme la DACCS électrochimique progresse plus vite que ce qui est rapporté dans la littérature, avec des démonstrateurs déjà opérationnels. De telles méthodes ont donc été incluses.

Toutes les méthodes d'EDC mentionnées ci-dessous ont été retenues dans l'étude sauf l'enfouissement des algues, la fertilisation des océans et la pompe artificielle de surface/profondeur car les bénéfices de ces méthodes n'ont pas été suffisamment démontrés dans la littérature.

Le GIEC présente une vue d'ensemble des différentes méthodes d'EDC avec les mises en œuvre possibles, les moyens de stockage (minéraux, géologiques, sols, sédiments marins) et les durées de stockage du carbone (siècles, millénaires, etc...). Les solutions retenues, les moyens de stockage et la durée de celui-ci sont dans la Figure 2.

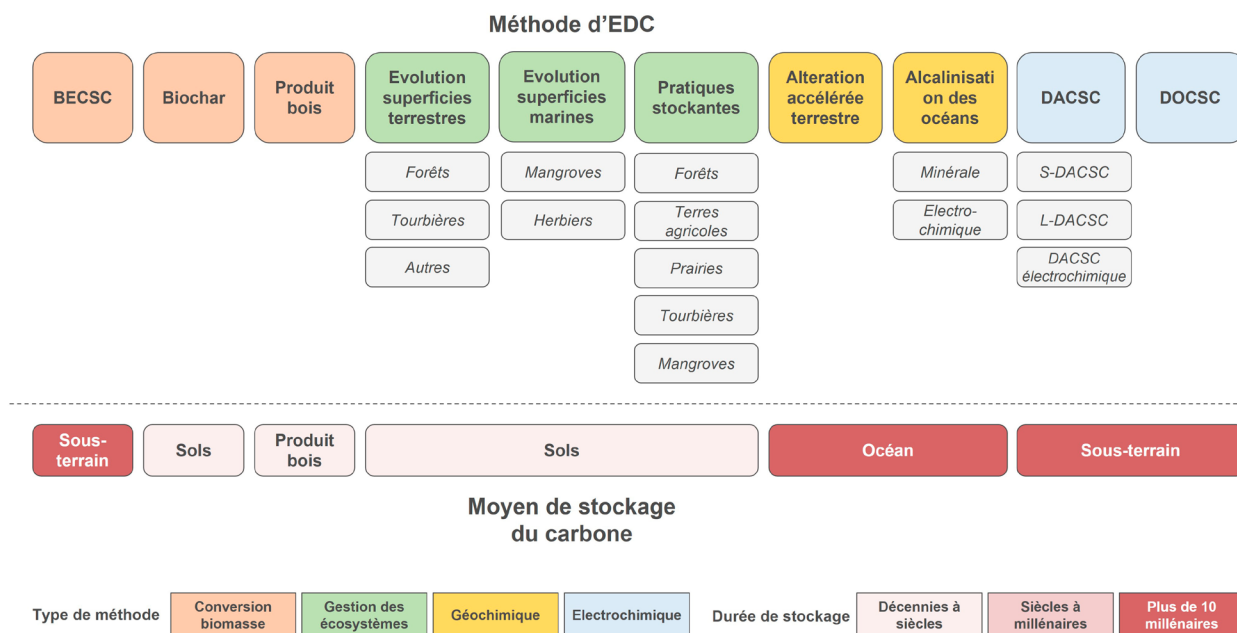


Figure 2 – Vue d'ensemble des solutions d'EDC retenues. Adapté de (2)

Une caractéristique essentielle des méthodes d'EDC est la durée de stockage du carbone qu'elles permettent. On distingue ainsi les méthodes d'EDC à stockage temporaire (ou faible permanence) des méthodes à stockage long-terme (ou permanence élevée). Si toutes les méthodes sont nécessaires, le bénéfice climatique créé par ces deux catégories est différent. Ce critère est utilisé en partie 8 pour comparer le niveau de permanence du portefeuille d'EDC proposé avec la nature des émissions résiduelles que la France anticipe pour 2050.

3.3. Besoins en ressources des méthodes d'EDC retenues

Pour estimer le potentiel de déploiement de chacune des méthodes considérées, il est nécessaire de connaître leurs besoins en ressources : combien de mètres cubes d'eau, d'hectares de terres ou encore de mégawattheures d'électricité sont nécessaires pour générer une tonne nette éliminée. Deux défis se présentent pour quantifier ses besoins avec précision :

- Les méthodes sont très diverses, avec dans chaque « famille » plusieurs variantes qui peuvent être significativement différentes
- Les données sont encore rares car la plupart des méthodes en sont encore à des stades de développement très préliminaires et les données de terrain manquent

De plus, il est nécessaire de comparer les méthodes sur une base commune. Or tous les processus à émissions négatives occasionnent des émissions de gaz à effet de serre lorsque qu'ils fonctionnent. Il faut donc quantifier les besoins en ressources sur la base d'une tonne nette éliminée, c'est-à-dire une fois décomptées les émissions générées par le processus. On cherche donc dans l'idéal, des données quantifiées sur la base d'une analyse de cycle de vie (ACV) du processus.

On trouve des données dans la littérature scientifique. Elles ont l'avantage d'être publiées avec le détail de la méthode utilisée pour les produire, et d'avoir fait l'objet d'un processus de révision par des pairs. En revanche, la majorité des études sont basées sur des expériences à l'échelle du laboratoire, ou sur de la modélisation, elle-même basée sur un nombre restreint de données. La pertinence de ses données en conditions réelles est donc incertaine. Par ailleurs, rares sont les études scientifiques qui incluent une ACV.

Les données provenant de « faiseurs », c'est-à-dire des entreprises qui lancent des démonstrateurs ou même qui sont déjà en activité sont rares mais elles existent. On en trouve par exemple dans les dossiers de candidature au fond Frontier, qui sont accessibles au public (17). Ces données proviennent du terrain et reflètent donc mieux les performances réelles des différentes méthodes d'EDC. En revanche, on dispose de beaucoup moins d'information sur comment elles sont obtenues, et pourraient être considérées comme « déclaratives » étant donné que personne ne les a vérifiées.

Pour construire une base données permettant d'estimer ces besoins en ressources, Carbon Gap s'est associé à RMI. Etant données les difficultés mentionnées plus haut, l'équipe a choisi de construire sa base de données sur trois piliers : la littérature scientifique, les données de dossiers de candidature à Frontier (trois cohortes) et enfin une enquête menée directement auprès des opérateurs d'EDC.

La base de données va continuer d'évoluer après la publication de ce rapport, mais au moment de la publication, elle comprend :

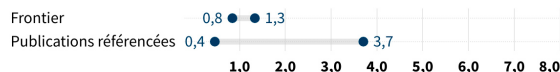
- 333 données obtenues de 87 articles scientifiques
- 90 données obtenues de 67 dossiers Frontier
- 46 données obtenus de 11 réponses à l'enquête

La Figure 3 donne un aperçu des données collectées sur les besoins en minerai pour l'altération accélérée et sur les consommations énergétiques de la DACCS et de la DOCCS. Elle illustre aussi les défis mentionnés plus haut, avec une variabilité importante selon les sources, et un biais régulier de la littérature scientifique vers des valeurs optimistes.

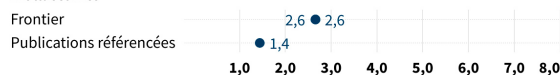
Altération accélérée terrestre

Besoins en minéraux, en tonnes par tonne nette de CO₂ éliminée

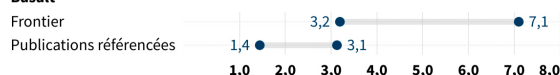
Olivine



Wollastonite



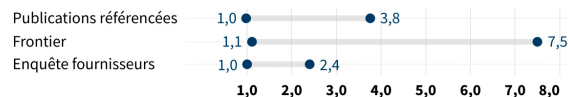
Basalt



Gammes de consommations énergétiques

en MWh/tCO₂, selon les sources

DOCCS



DACCS

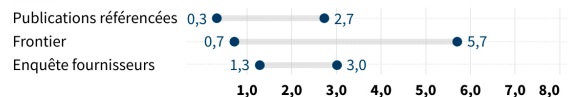


Figure 3 : Aperçu des données collectées sur les besoins en ressources pour l'altération accélérée (gauche), la DACCS et la DOCCS (droite).

Les données ont été compilées pour dégager des valeurs consolidées pour chacune des ressources nécessaires aux méthodes d'EDC. Ces valeurs sont utilisées dans la suite du rapport pour estimer le potentiel des méthodes d'EDC à partir des gisements de ressources disponibles.

4. Gisements de ressources nécessaires à la mise en œuvre des méthodes d'EDC

Dans cette partie, les gisements de ressources physiques nécessaires à la mise en œuvre des méthodes d'EDC retenues sont passés en revue pour déterminer leur taille totale, leur niveau de disponibilité, et la tendance qu'ils suivent (croissance, stagnation ou décroissance). Dans la mesure du possible, la distribution géographique de chaque ressource est également caractérisée.

Chacune des sections suivantes, consacrées à une ressource, commence par un résumé des résultats, avant de présenter le détail de la méthodologie ayant servi à les obtenir

4.1. Electricité renouvelable

En bref

L'estimation du gisement théorique d'électricité renouvelable se base largement sur les travaux de RTE publiés dans le rapport (18). A long terme (2050), le gisement d'électricité renouvelable théoriquement disponible pour l'EDC pourrait s'élever à 382 TWh. Il serait composé essentiellement d'énergie photovoltaïque, d'éolien en mer et d'éolien terrestre. Un tel volume de production serait disponible si le développement de ces énergies renouvelables était poussé au maximum. Cette estimation se base sur un scénario de consommation maximale, de type « réindustrialisation profonde » pour préserver les usages existants et anticiper l'électrification. Si ce gisement (382 TWh) se matérialisait en 2050, il pourrait donc, en théorie, être affecté à l'EDC qui deviendrait alors le principal consommateur d'électricité en France, devant l'industrie et le résidentiel comme l'illustre le graphique suivant.

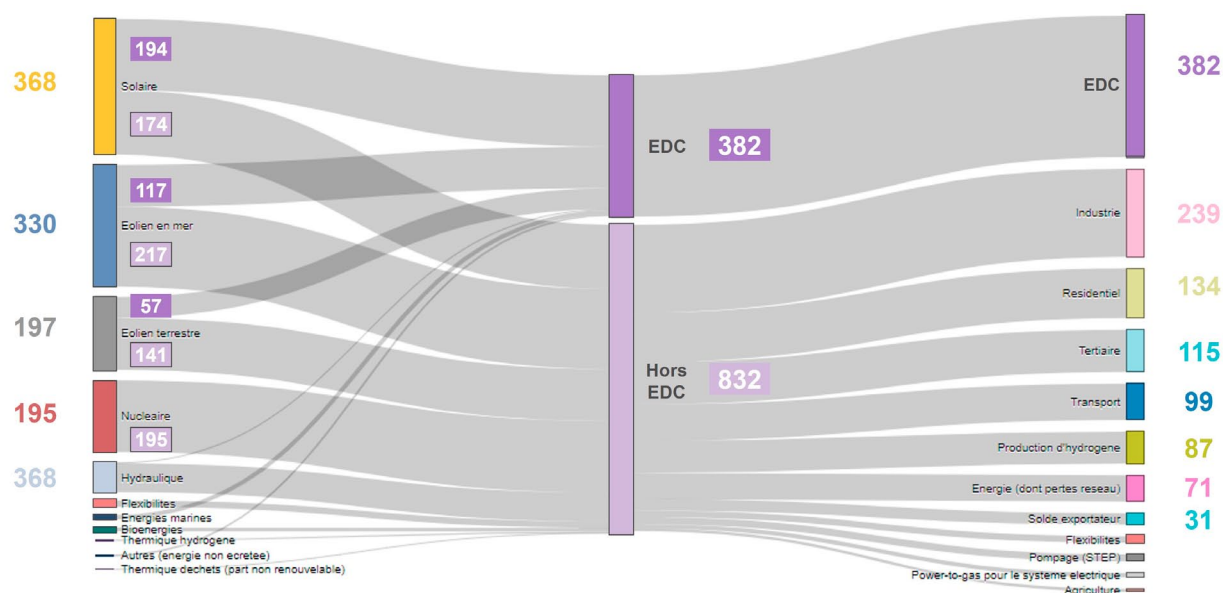


Figure 4 – Bilan de la production (gauche) et de la consommation (droite) d'électricité (en TWh) à long terme (2050) et mise en exergue du gisement d'électricité disponible pour les technologies d'EDC

Une répartition de l'électricité entre les différentes méthodes d'EDC consommatrices sera réalisée en partie 5 du rapport.

Méthodologie détaillée

La méthodologie d'estimation du gisement repose sur le rapport de RTE « Futurs énergétiques 2050 ». Celui-ci présente six scénarios de production d'électricité à horizon 2022-2050 : M0, M1, M23, N1, N2 et N03. Les trois premiers présentent un fort développement des énergies renouvelables tandis que les autres scénarios présentent un développement équilibré entre les énergies renouvelables et le nucléaire. Le scénario N03 est le scénario le plus ambitieux sur le développement du nucléaire. Trois trajectoires de consommation sont explorées, une trajectoire de référence (ou tendancielle), un scénario sobriété et un scénario de « réindustrialisation profonde » dans lequel la consommation d'électricité connaît une augmentation maximale due aux besoins de l'industrie relocalisée.

La méthodologie pour estimer le volume d'électricité disponible pour l'EDC se résume ainsi :

- 1) Collecter les données de production par sources d'énergie des six scénarios de RTE en 2060
- 2) Choisir la moyenne des scénarios N1 et N2 comme scénario de référence
- 3) Identifier et collecter les valeurs maximales de production pour chacune des énergies renouvelables dans tous les scénarios
- 4) Sommer les maximums de production de toutes les énergies renouvelables pour obtenir un scénario maximisant
- 5) Soustraire le volume de production d'électricité renouvelable du scénario de référence au scénario maximisant pour obtenir le volume d'électricité qu'il serait en théorie possible d'obtenir en poussant le déploiement de toutes les énergies renouvelables au maximum.

Encadré 1 – Méthodologie estimation du gisement en électricité

Pour estimer la production d'électricité renouvelable maximale, la **production maximale** de chaque technologie de production parmi les six scénarios de production de RTE (M0, M1, M23, N1, N2 et N03) en 2060 a été retenue. La valeur de référence a été obtenue en faisant la moyenne des scénarios N1 et N2 car ces scénarios semblent les plus réalistes à l'aune des récentes déclarations du gouvernement français concernant la construction de nouveaux réacteurs nucléaires en France, notamment le discours du président de la République Emmanuel Macron à Belfort le 10 février 2022 ([retranscription du discours](#)). Ce scénario moyen entre N1 et N2 est appelé scénario de « **référence gisement** » dans la suite.

Le scénario production maximale décrit précédemment a ensuite été comparé avec le scénario de « Référence gisement ». La différence entre le volume d'électricité renouvelable produite dans les deux scénarios donne une estimation du potentiel de production supplémentaire théoriquement possible, par source d'énergie renouvelable. Par ailleurs, il est supposé dans l'analyse que l'ajout d'une grande quantité d'unités d'EDC en France permettrait d'absorber les surplus de production d'électricité renouvelable. Ainsi toute l'énergie écrêtée est fléchée vers l'EDC dans notre analyse.

Avec cette démarche, la production d'électricité renouvelable (soustrait de l'écrêtement) serait de 615 TWh dans le scénario « Référence gisement » (horizon 2060) et de 997 TWh dans le scénario production maximale de RTE. La différence entre les deux scénarios donne ainsi une valeur de gisement d'électricité disponible pour l'EDC de 382 TWh (à l'horizon 2060).

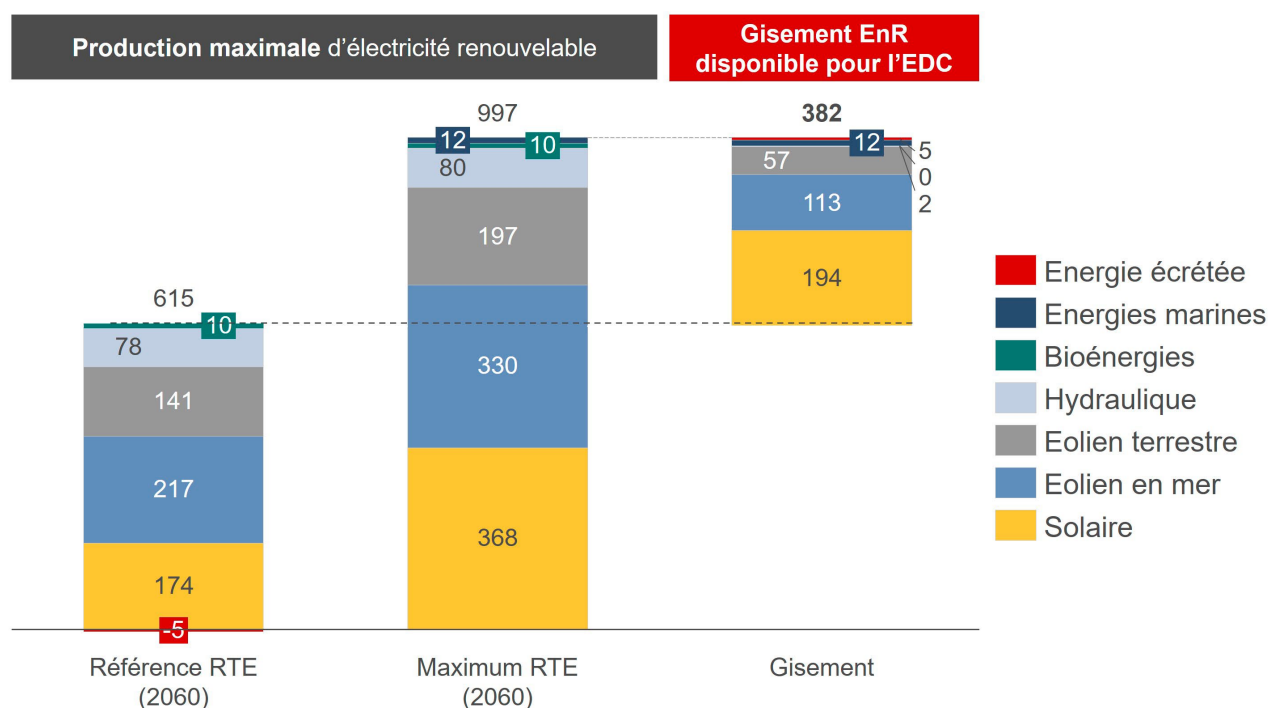


Figure 5 - Estimation des productions maximales et des gisements d'électricité renouvelable disponibles à pour l'EDC (en TWh)

Seul le gisement supplémentaire d'électricité renouvelable a été considéré dans l'estimation du gisement disponible pour de l'EDC. En effet, les sources d'électricité fossiles ne sont pas pertinentes pour faire de l'EDC et l'évolution du parc nucléaire dépend fortement des décisions du gouvernement et connaît généralement des délais importants. Dans la suite du rapport, la valeur de 382 TWh est retenue pour le gisement théorique maximum d'électricité renouvelable disponible pour l'EDC. Une répartition de l'électricité entre les différentes méthodes d'EDC consommatrices sera réalisée en partie 5 du rapport.

Avec l'essor de la filière des petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR) un gisement supplémentaire d'électricité bas carbone pourrait voir le jour et représenter une quantité significative d'énergie. Cette filière étant encore trop peu mature, elle n'est pas considérée dans l'estimation du gisement d'électricité disponible pour les méthodes d'EDC.

4.2. Chaleur fatale

En bref

Plusieurs méthodes d'EDC requièrent de la chaleur pour fonctionner, mais à différentes températures. Produire de la chaleur décarbonée pour ensuite faire fonctionner des processus d'EDC serait énergétiquement peu compétitif par rapport aux méthodes d'EDC électrochimiques. Nous ne considérons donc ici que la chaleur résiduelle ou chaleur fatale. Le gisement de chaleur fatale supérieure à 100°C s'élève à **52,9 TWh**.

Méthodologie

La méthodologie est en quelques mots :

- 1) Identifier le gisement total de chaleur fatale en France
- 2) Retrancher de ce gisement la chaleur fatale d'une température inférieure à 100°C car la S-DACCS nécessite une chaleur supérieure à 100°C

Encadré 2 – Méthodologie d'estimation du gisement de chaleur

La France dispose d'un gisement de chaleur fatale, non valorisé aujourd'hui, de ~117 TWh (19). Ce gisement provient pour l'essentiel de l'industrie avec 109 TWh. Les 8 TWh restants sont répartis dans d'autres secteurs d'activité comme les data centers, les stations d'épuration des eaux usées (STEP) ou les Usine d'Incinération des Ordures Ménagères (UIOM).

La répartition du gisement de l'industrie est décrite dans le tableau ci-dessous, avec les fourchettes de température de chaque secteur :

Secteurs d'activités	Répartition du gisement industrie de 109,5 TWh	Fourchette de températures principales des effluents	Fourchette de températures secondaires des effluents
Agro-alimentaire	31%	< 40 °C	100 – 250 °C
Chimie plastique	22%	< 40 °C	100 – 250 °C
Papier carton	13%	< 80 °C	100 – 250 °C
Métaux dont sidérurgie	12%	200 – 250 °C	> 500 °C
Matériaux non métallique (ciment, verre)	11%	100 – 250 °C	400 – 500 °C
Raffinage	3%	200 – 250 °C	150 – 200 °C
Autres	8%	n/a	n/a

Tableau 1 – Répartition du gisement de chaleur fatale de l'industrie (19)

La chaleur fatale des différentes centrales thermiques françaises (principalement nucléaires), représentant plusieurs centaines de TWh, n'a pas été pris en compte dans le gisement de chaleur fatale. En effet ces gisements de chaleurs ne sont, par construction, pas exploités ou facilement exploitables, notamment pour les centrales nucléaires où la contrainte de sûreté et de certification rend dans la pratique des rétrofits difficile.

Il n'y a pas dans le gisement de chaleur identifié, de gisement de chaleur entre 300 °C et 900 °C, nécessaire pour la technologie L-DACCS avec solvant liquide. Ainsi, en raison de l'incertitude sur le volume quantifié de chaleur fatale compatible avec de la L-DACCS, le gisement de chaleur pour cette technologie est considéré nul.

Pour ce qui est de la S-DACCS, les températures doivent être supérieures à 80°C. L'ADEME ne donne qu'une vision de la chaleur fatale pour l'industrie supérieure à 100°C qui s'élève à **52,9 TWh**. C'est cette valeur qui est prise comme gisement de chaleur fatale pour le S-DACCS. Cette valeur est conservatrice, car la température considérée est au-dessus de la température requise par la technologie et puisqu'elle ne prend pas en compte le gisement de chaleur des centrales thermiques nucléaires, gaz et charbon françaises, à des températures supérieures à 100 °C. En revanche, il est probable que ce gisement diminue d'ici à 2050, par la mise en œuvre de mesure d'efficacité énergétique, que les usages de la chaleur fatale restante se multiplient (concurrence pour la ressource).

Avec l'essor de la filière des petits réacteurs nucléaires modulaires (SMR) un autre gisement de chaleur bas carbone pourrait voir le jour et représenter une quantité significative d'énergie. Cette filière étant encore trop peu mature, elle n'est pas considérée dans l'estimation du gisement de chaleur disponible pour les méthodes d'EDC.

4.3. Biomasse

En bref

La biomasse est utilisée comme intrant par différentes méthodes d'EDC : biochar, BECSC et produits biosourcés. L'inventaire présenté dans cette partie suggère un gisement théorique maximal de **61 millions de tonnes de biomasse non forestière et 37 millions de m³ de bois** qui pourrait être disponible pour l'EDC. Le premier gisement est une vision agrégée de quatre catégories de biomasse différentes : la biomasse issue de l'agriculture non alimentaire, les déchets urbains, les coproduits de l'industrie agro-alimentaire et la biomasse forestière. Chaque catégorie contient elle-même plusieurs types de biomasse différents. Le Tableau 2 présente les différentes catégories de biomasse, types de biomasse et gisement disponible pour réaliser de l'EDC.

Catégorie	Type de biomasse	Unité	Gisement pour l'EDC
Biomasse issue de l'agriculture non alimentaire	Cultures dédiées	MtMS/an	0,1
	Cultures intermédiaires	MtMS/an	4,4
	Déchets agricoles	MtMS/an	17,8
	Effluents d'élevage	MtMS/an	24,7
	Plantes à fibre	MtMS/an	0,3
	Plantes à parfum	MtMS/an	0,03
Déchets urbains	Déchets verts urbains	MtMB/an	5,14
	Huiles alimentaires usagées	MtMB/an	0,08
	Déchets papiers/cartons	MtMB/an	0,14
	Déchets issus du bois	MtMB/an	2,3
	Boues d'épuration	MtMS/an	0,2
	Déchets ménagers et assimilées	MtMS/an	4,9
Coproduits de l'industrie agro-alimentaire	Trituration oléagineux	MtMB/an	0,64
	Betterave sucrerie	MtMB/an	0,15
	Fruits-légumes transformés	MtMB/an	0
	Vinification	MtMB/an	0,06
	Industries des viandes	MtMB/an	0,36
	Ovoproduits	MtMB/an	0
	Pêche et aquaculture	MtMB/an	0,04
	Distillation vinicole	MtMB/an	0,18
	Cidrerie	MtMB/an	0,01
	Pomme de terre	MtMB/an	0
Biomasse forestière	Haies et agroforesterie	Mm3/an	3,4
	Prélèvements en forêts	Mm3/an	33

Tableau 2 – Présentation des différentes catégories et types de biomasse
(cf. détail de la méthodologie ci-dessous pour les sources utilisées)

Méthodologie

La méthodologie utilisée pour estimer le gisement en biomasse peut être résumée, pour chaque type

- 1) Identifier le volume de biomasse total produit annuellement
- 2) Retrancher les volumes contraints (contraintes techniques et volumes non pertinents pour l'EDC)
- 3) Retrancher les volumes affectés à des usages prioritaires (alimentation, meilleure gestion des sols, etc.)
- 4) Répartir les volumes restant entre les différentes usages (combustion et méthanisation pour le BECCS, matériaux et recyclage pour produits biosourcés, et biochar) cf. partie 6
- 5) Sommer les volumes selon les usages utiles aux méthodes d'EDC cf. partie 6

Encadré 3 – Méthodologie d'estimation du gisement en biomasse

de biomasse, de la façon suivante :

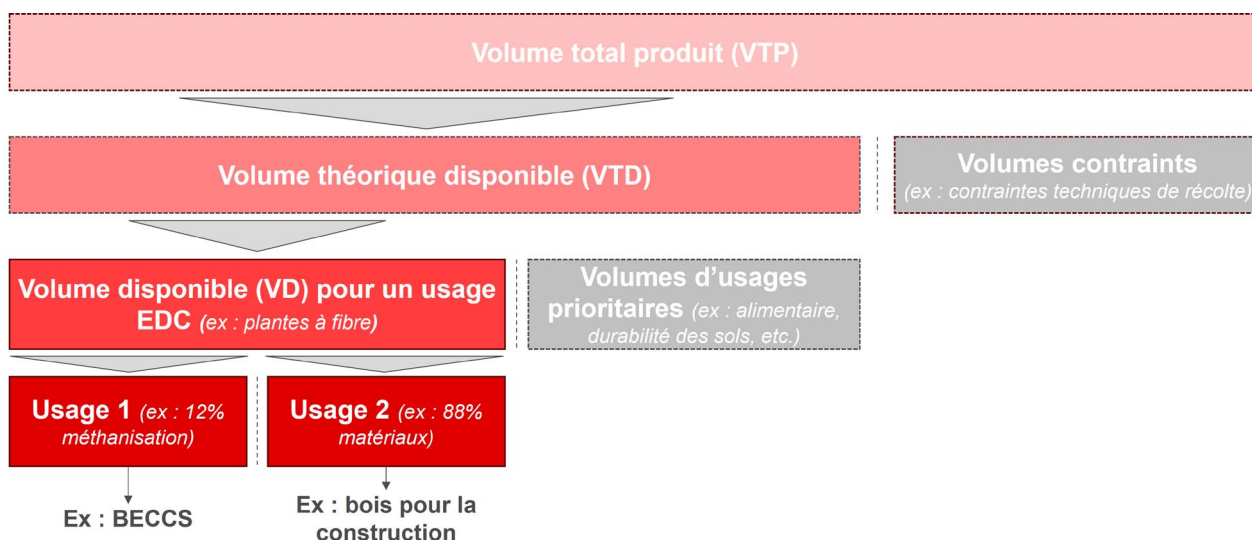


Figure 6 – Méthodologie d'estimation du gisement des méthodes EDC associées à un intrant biomasse

Cette méthodologie se décline selon le type de biomasse en fonction des données disponibles. Le détail est présenté dans le tableau ci-dessous. Les sources principales utilisées sont :

- ONRB : Observatoire National des Ressources en Biomasse
- Base de données Modecom (2017)
- Base de données SINOE, gérée par l'ADEME (2021)
- Inventaire forestier de l'IGN (2012 – 2020)
- ADEME, « *Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ?* » (2018)
- Base de données Agreste (2021)

En vision agrégée, l'application de la méthodologie donne, pour la biomasse non forestière, un gisement de 61 Mt/an disponible pour l'EDC à partir d'un gisement total produit de 273 Mt/an (Figure 7). Le gisement total est estimé à partir des valeurs historiques de 2018 – 2021 selon les catégories de biomasse dont les évolutions constatées sont relativement limitées. Aucune évolution n'est anticipée pour estimer le gisement total à 2050.

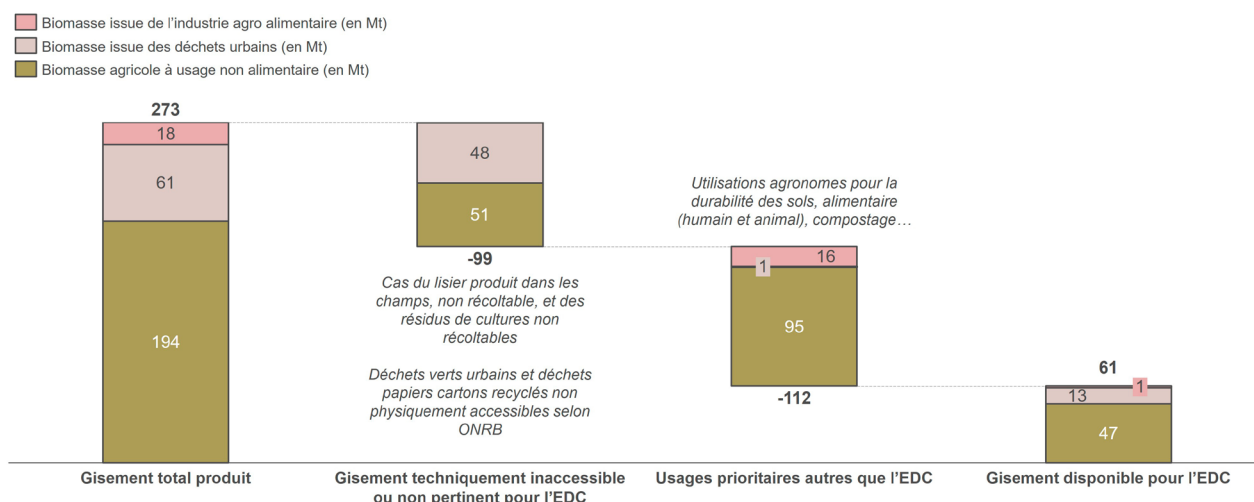


Figure 7 – Estimation du gisement disponible de biomasse non forestière pour l'EDC, en Mt/an (MS ou MB)

Pour la biomasse forestière, l'application de la méthodologie donne un gisement de 37 Mm³/an de bois disponible pour l'EDC à partir d'un gisement total de bois produit chaque année dans les forêts françaises de 91 Mm³/an (Figure 8). A noter tout de même, que la qualité de cette ressource a tendance à diminuer avec le temps. En effet, la mortalité des arbres est plutôt en hausse ces dernières années, et la croissance est ralentie par les effets du réchauffement climatique notamment le manque d'eau.

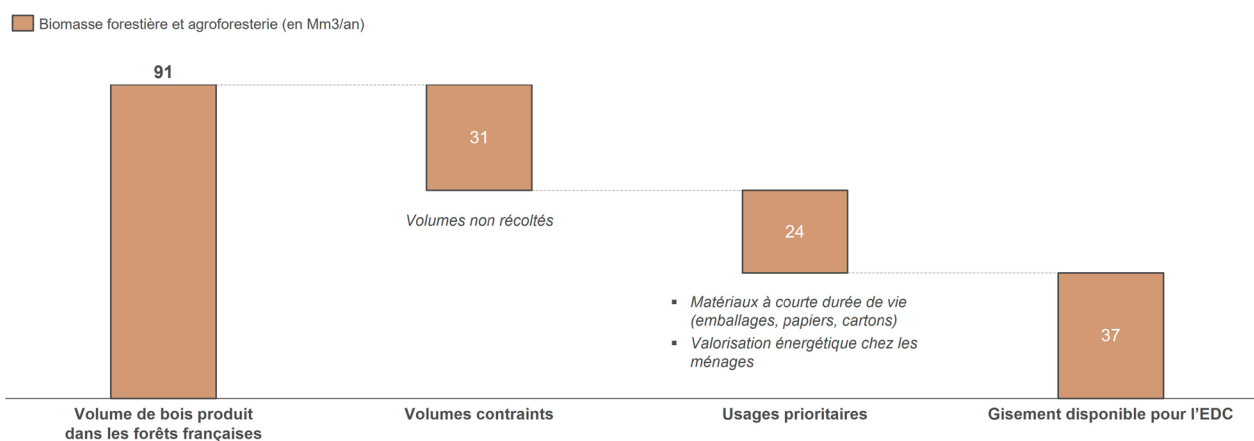


Figure 8 – Estimation du gisement de bois disponible pour l'EDC, en Mm³/an

Ainsi, le gisement en ressources de biomasses disponibles s'élève à environ 60 Mt pour la biomasse d'origine non forestière et à 37 Mm³ pour la biomasse forestière.

4.4. Surfaces terrestres

En bref

L'estimation du gisement en surfaces terrestres se concentre sur les méthodes d'afforestation et reforestation, d'évolution des superficies de tourbières et les pratiques stockantes. Le foncier nécessaire pour les unités de BECSC, de DACCS ou de biochar est considéré comme négligeable.

Les évolutions les plus favorables pour l'EDC des superficies de terres seraient selon le scénario S1 de l'ADEME de + 2,9 Mha de forêts entre aujourd'hui et 2050. En contrepartie, ce scénario envisage une diminution des superficies de cultures et de prairies.

Méthodologie

La méthodologie d'estimation du gisement de ces terres repose sur les ressources bibliographiques suivantes :

- Le rapport de l'ADEME « *Transition 2050* » (2020)
- Le rapport de l'INRAE « *Stocker du carbone dans les sols français* » (2021)
- Le rapport « *Les milieux humides et aquatiques continentaux* » du Commissariat Général au Développement Durable (2018)
- Le rapport « *Pourquoi restaurer les tourbières ?* » du Conservatoire d'espaces naturels
- Les bases de données « Corine Land Cover » et « TERUTI LUCAS »

De façon globale, la méthodologie est décrite dans l'encadré ci-dessous.

Pour l'augmentation des superficies de forêts et de tourbières :

- **Afforestation et reforestation :**
 - Identifier le scénario de l'ADEME qui présente le puits naturel le plus élevé et le choisir comme scénario maximisant
 - Identifier les évolutions des superficies terrestres dans ce scénario maximisant, en particulier les surfaces de forêts
- **Augmentation des superficies de tourbières :**
 - Utilisation de la base de données « Corine Land Cover » et « TERUTI LUCAS » pour estimer la superficie actuelle des tourbières
 - Utilisation du rapport « *Les milieux humides et aquatiques continentaux* » du Commissariat Général au Développement Durable (2018) pour estimer la perte de tourbières entre 1945 et 2022 et ainsi le potentiel d'augmentation des superficies des tourbières si on recréait des tourbières là où elles ont disparu

Pour les pratiques stockantes :

- **Pour les cultures, prairies et vignes :**
 - Identifier les superficies maximales en 2021 sur lesquelles les pratiques stockantes pourraient être mises en œuvre sur la base du rapport de l'INRAE
 - Identifier les superficies maximales de mise en œuvre des pratiques stockantes en 2050 à partir de l'évolution des superficies vue par l'ADEME
- **Pour les forêts :**
 - Identification de la superficie totale des forêts
 - Hypothèse (simplificatrice) que les pratiques stockantes forestières peuvent être mises en œuvre sur toute la surface des forêts
- **Pour les tourbières :**
 - Utilisation de la base de données « Corine Land Cover » et « TERUTI LUCAS » pour estimer la superficie actuelle des tourbières
 - Utilisation du rapport « *Pourquoi restaurer les tourbières ?* » du Conservatoire d'espaces naturels pour estimer la part des tourbières actuelles dans un état écologique dégradé et qui pourraient donc être restaurées.

Encadré 4 – Méthodologie d'estimation des gisements en superficies pour l'afforestation et la reforestation, l'augmentation des superficies des tourbières et les pratiques stockantes, en 2050

Estimation du gisement d'augmentation des superficies de forêts et de tourbières :

Pour les forêts :

Le rapport de l'ADEME « Transitions 2050 » présente quatre scénarios de transition vers la neutralité carbone en 2050. Les scénarios sont appelés « Génération frugale » (S1), « Coopérations territoriales » (S2), « Technologies vertes » (S3) et « Pari réparateur » (S4).

Chacun des scénarios envisage une évolution du puits de carbone naturel plus ou moins importante à l'horizon 2030-2050. Le scénario S1 présente le puits de carbone naturel le plus élevé en 2050 et donc l'évolution des surfaces terrestres la plus favorable à ce puits. Le scénario S1 a ainsi été sélectionné pour estimer les potentiels d'évolution des surfaces terrestres.

Les scénarios de l'ADEME décrivent l'évolution des superficies en « forêts et peupleraies », « cultures maraichères », « landes, friches, jachères », « vergers », « surfaces artificialisées », « vignes », « prairies permanentes », « prairies temporaires » et « Cultures (céréales, oléagineux, protéagineux, cultures industrielles) ». Cependant, l'ADEME ne fait pas mention de l'évolution des superficies des zones humides (dont les tourbières) et des autres sols naturels. Les superficies non décrites par l'ADEME ont été catégorisées comme « Autres terres » dans ce rapport afin de boucler avec la superficie totale finie de la France. L'évolution des superficies de ces types de terre entre aujourd'hui et 2050 selon le scénario S1 de l'ADEME est présentée sur la Figure 9.

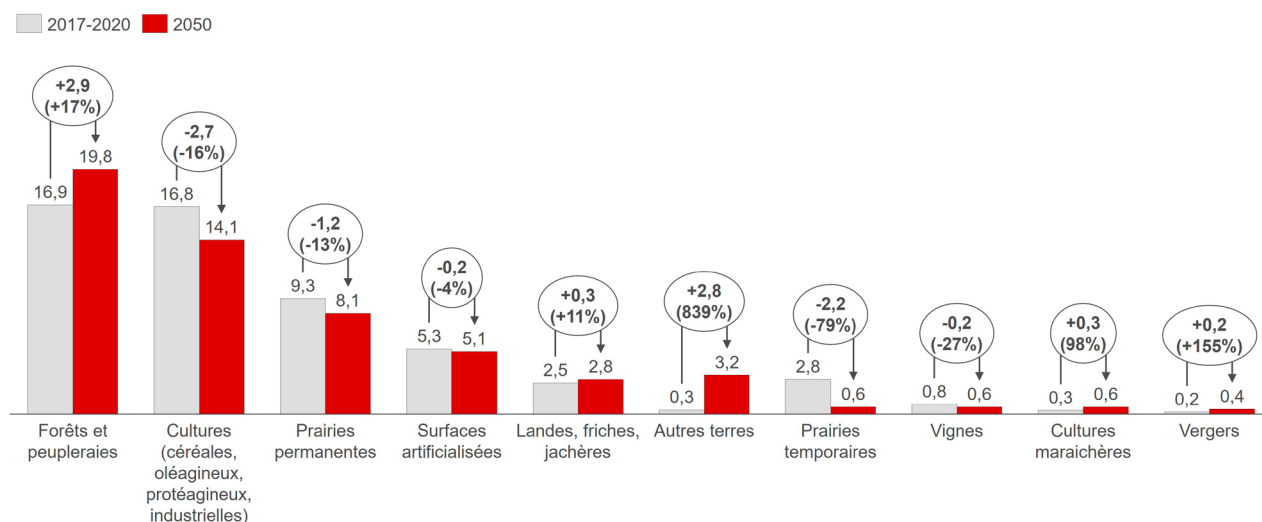


Figure 9 – Evolution de la répartition des terres (Mha) entre 2017-2020 et 2050 selon le scénario S1 de l'ADEME (20)

Selon ce scénario, les forêts devraient croître de 2,9 millions d'hectares entre 2050 et 2017-2020, les cultures maraichères, les landes, friches, jachères et les vergers devraient croître également. En revanche les superficies de prairies permanentes, de prairies temporaires et de cultures (céréales, oléagineux, protéagineux, industrielles) devraient décroître. Ces évolutions de superficies s'expliquent par les caractéristiques du scénario S1 de l'ADEME. Celui-ci suppose notamment :

- Un arrêt de l'artificialisation des sols puis une diminution des surfaces artificialisées
- Une transformation profonde des pratiques agricoles (agroécologie, couverts végétaux, semis direct, etc...)
- Une augmentation considérable des réserves naturelles intégrales
- Une évolution profonde des régimes alimentaires (-70% de consommation de viande)
- Une limitation de la récolte du bois

Pour les tourbières :

Les données de la base de données « Corine Land Cover » (CLC) et « TERUTI-LUCAS » ont été utilisées pour estimer la surface actuelle des tourbières. Ces sources statistiques sont explicitées ci-dessous :

Corine Land Cover (CLC) est un inventaire biophysique de l'occupation des sols et de son évolution en 44 postes pour la France métropolitaine et 50 postes pour les départements d'outre-mer (DOM). Cette base de données dépend de l'Agence Européenne de l'Environnement et est issue de l'observation satellitaire. L'information est codée en trois niveaux allant de 5 à 44 postes. Après un premier millésime en 1990, CLC offre une photographie complète de l'occupation des sols et de son évolution, tous les six ans depuis 2000.

Teruti-Lucas est une base de données dépendant du ministère en charge de l'agriculture et reposant sur une enquête statistique de l'occupation physique des terres (pelouse, blé...) et d'usage (agricole, naturel et habitat, loisir, industrie...) afin de suivre et quantifier les changements d'occupation et d'usage des sols et de la structure des paysages au fil du temps (88). Cette enquête est réalisée chaque année depuis 1981 par le Service de la statistique et la prospective du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

Les données de Corine Land Cover (CLC) de superficies par commune ont été collectées et cumulées pour avoir des superficies nationales. Puis, les données de CLC ont été ajustées de sorte que la somme des surfaces « Zones humides » et « Surfaces en eau » issues de CLC (2018) boucle avec la superficie de la catégorie « Sous les eaux » de TERUTI-LUCAS (2019-2020-2021). Les chiffres obtenus sont une surface des tourbières de 7111 ha en 2006 et de 7 690 ha en 2018.

Selon le rapport « *Les milieux humides et aquatiques continentaux* » du Commissariat Général au Développement Durable (2018), « *On estime notamment que la moitié des tourbières ont disparu entre 1945 et les années 2000* » (21). Il y avait ainsi deux fois plus de tourbières en 1945 que les années 2000 (par exemple 2006), soit environ 14 000 ha de tourbières en 1945.

D'un point de vue théorique, il existe donc un **gisement théorique de tourbières** à recréer de **~6 500 ha**. Les évolutions les plus favorables des superficies de terres seraient donc au maximum (avec quelques arrondis) :

Surfaces	Unité	Capacité max d'évolution des superficies (horizon 2050)	Gisement max de surfaces à l'horizon 2050	Surfaces aujourd'hui (2017-2020)
Les forêts et peupleraies	Mha	+2,9	19,8	16,9
Les cultures	Mha	-2,7	14,1	16,8
Les vignes	Mha	-0,21	0,58	0,79
Les prairies permanentes	Mha	-1,2	9,3	8,1
Les prairies temporaires	Mha	-2,2	2,8	0,6
Les tourbières	Mha	0,0065	0,0142	0,0077
Les sols artificialisés	Mha	-0,2	5	5,2

Tableau 3 – Scénario d'évolution la plus favorable des superficies terrestres

Gisement en superficies pour les pratiques stockantes :

Pour la mise en œuvre des pratiques stockantes, seule une partie des surfaces des forêts et peupleraies, des vignes, des prairies et des tourbières pourraient être utilisées à cause de contraintes techniques liées à la spécificité des sols, au climat de la région, au type de plantation cultivées selon la localisation géographique, etc... Dans cette partie, le gisement physique en superficie de mise en œuvre de ces pratiques est estimé en trois temps : les cultures, prairies et vignes d'abord, les forêts ensuite, puis les tourbières.

Pour les cultures, prairies et vignes :

Le rapport de l'INRAE « *Stocker du carbone dans les sols français* » (2020) présente des superficies de mise en œuvre des pratiques stockantes liées aux forêts, aux cultures, aux prairies et aux vignes en France. Pour chaque pratique stockante, l'INRAE a appliqué des critères pour estimer les surfaces sur lesquelles il est possible de mettre en œuvre ces pratiques. Ces critères sont détaillés en annexe 10.3. Les résultats des surfaces disponibles pour la mise en œuvre des pratiques stockantes sont précisées dans la Figure 10.

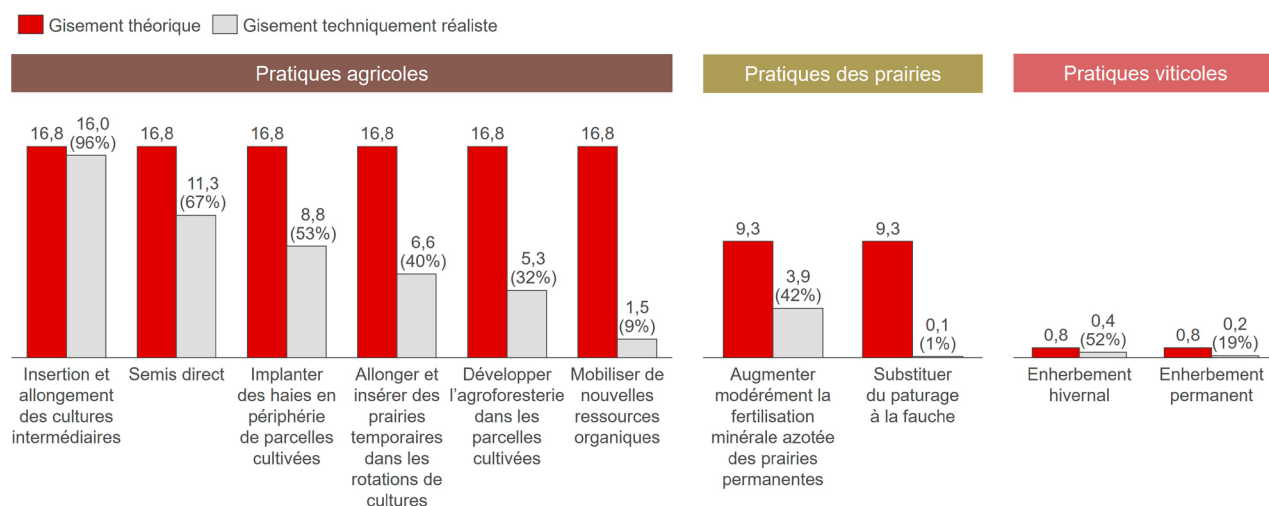


Figure 10 – Superficies sur lesquelles les pratiques stockantes agricoles, des prairies et viticoles pourraient se déployer en théorie (sans contraintes) et de manière réaliste en 2020, en Mha (12)

En combinant les travaux de l'ADEME sur la répartition des surfaces disponibles en 2050, et de l'INRAE (ratio des terres éligibles pour les pratiques stockantes), il est possible d'estimer les surfaces qui pourraient permettre de mettre en œuvre les pratiques stockantes. La Figure 11 donne le gisement en 2020 et en 2050 selon le type de culture : terres agricoles, prairies et vignes. En valeur absolue, les superficies pour la mise en œuvre des pratiques stockantes varient ainsi de 1,5 à 16 millions d'hectares pour les pratiques agricoles, de 0,1 à 3,9 millions ha pour les pratiques des prairies et de 150 000 à 410 000 ha pour les vignes.

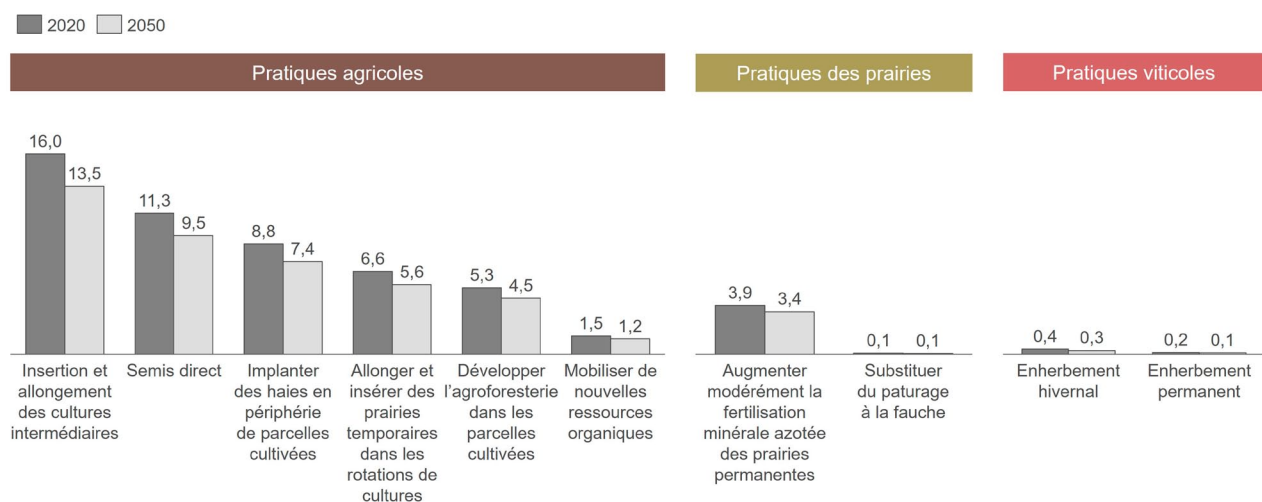


Figure 11 – Superficies sur lesquelles les pratiques stockantes agricoles, des prairies et viticoles pourraient plausiblement se déployer en 2020 et en 2050, en millions d'hectares (ADEME et INRAE)

Pour les forêts :

Pour les pratiques forestières, l'hypothèse est prise que 100% des forêts françaises pourraient être mieux gérées de façon à absorber plus de carbone dans un premier temps. Dans un second temps, l'hypothèse pourra être affinée en prenant en compte les différents régimes de propriété des forêts françaises (publiques, privées, etc...). La surface disponible pour la mise en place de ces pratiques serait donc de 16,9 Mha (forêts et peupleraies) en 2020 et 19,8 Mha en 2050.

Pour les tourbières :

L'estimation du gisement des tourbières repose sur le fait que selon le Conservatoire d'espaces naturels, « 89% des surfaces d'habitats tourbeux en France sont dans un état de conservation défavorable (dégradé) » (22). Or, la superficie actuelle de tourbières est estimée à 7690 ha selon Corine Land Cover (2018) ajustées avec les données TERUTI-LUCAS (moyenne 2019-2020-2021). Le gisement en superficie de tourbières à restaurer est donc d'environ 6800 ha (89% de 7690 ha).

La part des superficies pouvant servir à mettre en place les pratiques stockantes est résumée ci-dessous.

Pratique stockante	Superficie concernée	Part utile	Surfaces (2020) (Mha)	Surfaces (2050) (Mha)
Pratiques stockantes agricoles				
Insertion et allongement des cultures intermédiaires	Grandes cultures (céréales, oléo protéagineux, fourragères)	96%	16,0	13,5
Semis direct		67%	11,3	9,5
Planter des haies en périphérie de parcelles cultivées		53%	8,8	7,4
Allonger et insérer des prairies temporaires dans les rotations de cultures		40%	6,6	5,6
Développer l'agroforesterie dans les parcelles cultivées		32%	5,3	4,5
Mobiliser de nouvelles ressources organiques		9%	1,5	1,2
Pratiques stockantes des prairies				
Augmenter modérément la fertilisation azotée des prairies permanentes	Prairies permanentes	42%	3,9	3,4
Substituer la fauche par du pâturage		1%	0,1	0,1
Pratiques stockantes viticoles				
Enherbement hivernal	Vignes	52%	0,4	0,3
Enherbement permanent		19%	0,2	0,1
Pratiques stockantes forestières				
Arrêter/éviter de récolter la biomasse des forêts (souches, houppiers)	Forêts françaises	100%	16,9	19,8
Réaliser des éclaircies avec un taux inférieur à 35%		100%	16,9	19,8
Privilégier la régénération naturelle d'un peuplement par rapport à la plantation		100%	16,9	19,8
Réduire la préparation mécanisée (labour, tranchées) lors de la plantation de nouveaux arbres ou la régénération assistée d'un peuplement forestier		100%	16,9	19,8
Augmenter la densité d'arbres du peuplement		100%	16,9	19,8
Accroître la diversité du peuplement		100%	16,9	19,8
Privilégier les espèces d'arbres qui stockent le plus de carbone		100%	16,9	19,8
Privilégier le renouvellement des arbres par la méthode « futaie » au lieu du « taillis »		100%	16,9	19,8
Privilégier les forêts avec plusieurs classes d'âge		100%	16,9	19,8
Augmenter la durée entre la régénération du peuplement forestier et la coupe finale		100%	16,9	19,8
Ajouter des engrais azotés aux sols forestiers		100%	16,9	19,8
Pratiques stockantes des tourbières				
	Tourbières	89%	6844 ha	12660 ha

Tableau 4 – Part des surfaces disponibles sur lesquelles les pratiques stockantes pourraient se mettre en œuvre

4.5. Surfaces marines côtières

4.5.1. Longueurs des côtes françaises

Plusieurs méthodes d'EDC requiert un accès au littoral, et certaines utilisent en particulier les plages pour accélérer naturellement l'altération de roches ou minéraux. La longueur totale des côtes françaises s'élève à 20 000 km comme décrit dans la Figure 12. Les territoires d'outre-mer représentent près de 75% de la longueur totale. La France Métropolitaine représente quant à elle le dernier quart avec près de 5500 km de côté (23). Cependant, les données manquent pour estimer la part de cette ligne littorale qui serait utilisable pour les méthodes géochimiques (plages non fréquentées notamment).

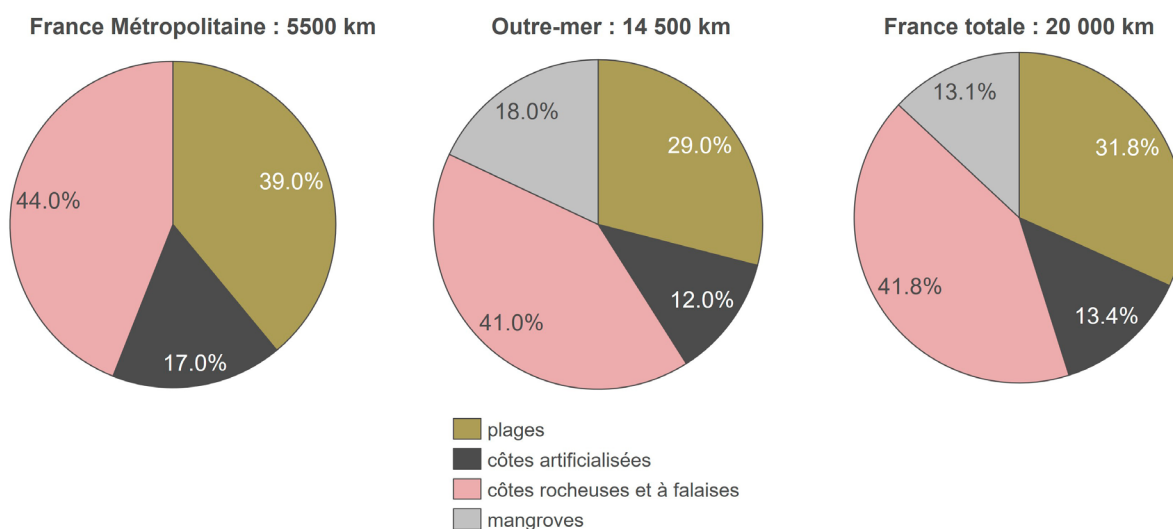


Figure 12 – Répartition des différents types de côtes françaises (23)

4.5.2. Gisement des mangroves pour l'EDC

La France en dispose actuellement de 104 000 ha de mangroves, dont 70 000 ha se trouvent en Guyane, 26 000 ha dans l'Océan Pacifique (Nouvelle-Calédonie, Wallis, Polynésie française), 6 000 ha dans les Antilles (Guadeloupe, St Martin, St Barthélemy, Martinique) et 1 000 ha dans l'Océan Indien (Mayotte et Europa) (24). Ces données datent de 2018 et peuvent avoir légèrement diminué aujourd'hui en considérant la tendance actuelle baissière.



Figure 13 – Localisation de mangroves à travers le monde : focus sur les mangroves françaises (25)

Les ressources bibliographiques utilisées sont :

- La Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES)
- Le Réseau d'Observation des Mangroves (ROM)
- L'évaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE), « Les écosystèmes marins et côtiers » (2018)

L'IPBES estime que, à l'échelle mondiale, 38% de leur surface a été perdue entre la fin du 19^{ème} siècle et aujourd'hui. Néanmoins, comme évoqué précédemment, les mangroves françaises (dont la Guyane française représente 70% de la superficie totale) n'ont pas perdu de surface, contrairement à la tendance mondiale. Il y a par exemple eu en Guadeloupe une augmentation de la surface de mangroves de 524 ha entre 1950 et 2020 (26). On peut donc chercher à augmenter les superficies de mangroves là où c'est possible, mais l'enjeu est aujourd'hui surtout de préserver les mangroves existantes et les surfaces actuelles. Pour être conservateur, le **gisement en superficie de mangroves à recréer** à l'échelle de la ZEE française est considéré comme nul.

Par ailleurs, les **pratiques stockantes** visant à stocker davantage de carbone dans les mangroves pourraient se déployer sur les 104 000 hectares de mangroves en France. Cependant, comme décrit précédemment les mangroves françaises sont en bon état, et ne présentent donc qu'un potentiel négligeable de restauration., l'enjeu est surtout de préserver les mangroves existantes plutôt que de déployer des pratiques stockantes sur celles-ci.

4.6. Surfaces sous-marines

En bref

Les surfaces sous-marines françaises sont utilisées pour les méthodes d'EDC d'augmentation des superficies des herbiers et de pratiques stockantes des herbiers. Les herbiers occupent une surface sous-marine de 220 mille hectares en France, répartis entre l'Outre-mer (55%), la mer Méditerranée (40%) et la Manche, la Mer du Nord et la façade Atlantique (5%) (24).

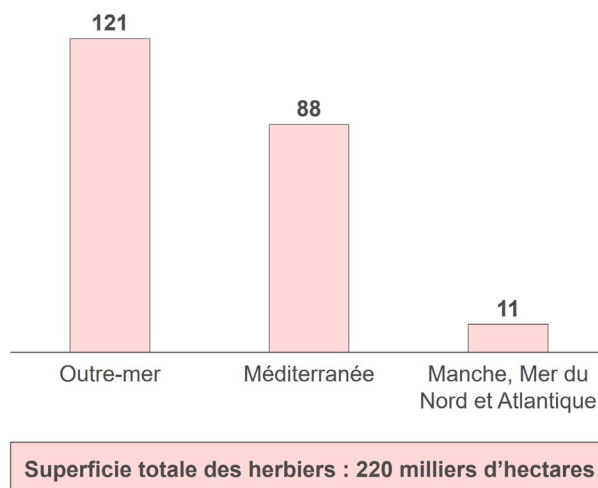


Figure 14 – Superficie des herbiers marins en France selon les zones géographiques, en milliers d'hectares (24)

La capacité théorique maximale d'augmentation de la superficie des herbiers marins en France serait d'environ 8 000 ha. Cette valeur correspond à la perte estimée des superficies d'herbiers en Méditerranée (herbiers de Posidonie) entre 1980 et 2012, qu'il serait peut-être possible de recréer.

Par ailleurs, les pratiques stockantes des herbiers pourraient être en mises en œuvre sur la superficie totale des herbiers, soit 220 mille hectares, même s'il n'existe pas d'étude précise sur la répartition spatiale et l'état de santé des herbiers.

Méthodologie

Les ressources bibliographiques utilisées sont :

- EFSE « *Les écosystèmes marins et côtiers* » (2018)
- IPBES « *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services* » (2019)
- L'Initiative Française pour les Récifs CORalliens (IFRECOR) « *Etat de santé des récifs coralliens, herbiers marins et mangroves des outre-mer français* » (2021)
- IFRECOR et Hily, *Les herbiers de phanérogames marines de l'outre-mer français* (2010)
- Telesca, « *Seagrass Meadows distribution and trajectories of change* » (2015)

Gisement théorique maximal d'augmentation des superficies des herbiers :

- Identifier la baisse des superficies des herbiers entre 1980 et aujourd'hui à l'aide de Telesca (2015) et l'EFSE (2018)
- Supposer que les superficies des herbiers détruites entre 1980 et aujourd'hui pourraient être recréées à l'avenir

Pratiques stockantes des herbiers :

- Identifier la superficie totale actuelle des herbiers marins en France
- Supposer que des pratiques stockantes peuvent être mises en œuvre sur toutes ces superficies

Encadré 5 – Méthodologie d'estimation du gisement théorique maximal d'augmentation des superficies des herbiers et de superficies de mise en œuvre des pratiques stockantes des herbiers

La méthodologie générale est :

Gisement EDC associé aux herbiers :

Les espèces d'herbiers varient selon la région géographique. En outre-mer, les herbiers présentent une grande diversité d'espèces par rapport aux herbiers de métropole avec entre 16 à 18 espèces différentes recensées. En Méditerranée, les herbiers sont très présents sur tout le pourtour littoral, de la surface jusqu'à 30 à 40 m de profondeur, et sont principalement composés de l'espèce *Posidonia Oceanica*. Dans la zone Manche, Mer du Nord et façade Atlantique, les herbiers sont majoritairement constitués des espèces appelées zostères marines et naines (*Zostera marina* et *Zostera noltei*) (24).

Les **pratiques stockantes** des herbiers pourraient être mises en œuvre sur la superficie totale des herbiers, soit 220 mille hectares, même s'il n'existe pas d'étude précise sur la répartition spatiale et l'état de santé des herbiers.

Concernant la capacité **d'augmentation de la surface des herbiers**, depuis la fin du 19^{ème} siècle, 30% de leur surface a été perdue à travers le monde, avec une perte de 10% par décennie des surfaces d'herbiers ces dernières décennies (27) (28).

La baisse des surfaces d'herbiers marins se retranscrit de manière inégale et incertaine dans la ZEE française. L'évolution des surfaces d'herbiers en Nouvelle-Calédonie (40% de la surface totale des herbiers français) est, faute de données, impossible à quantifier (29). Les herbiers marins de la Manche, Mer du Nord et Atlantique, seraient en régression sur certains sites (espèce : *Zostera noltei*), mais en progression en Manche (*Zostera marina*). Enfin, les herbiers de Posidonie de Méditerranée ont perdu près de 2 800 ha passant de env. 97 000 ha en 1980 à 94 000 en 2011 (9% de perte) (30). D'autres estimations données par l'EFSE, donnent en 2012, près de 88 000 ha d'herbiers en Méditerranée. Le gisement théorique en superficies d'herbiers marins pour la solution EDC d'augmentation des superficies d'herbiers pourrait être de ~9 milles hectares (97 – 88 000 ha).

Cependant, le changement climatique pourrait, en fonction des scénarios de réchauffement, jouer un rôle significatif sur le développement des herbiers. En effet, les herbiers de Posidonie de Méditerranée sont voués à disparaître dans les scénarios RCP6 et RCP8.5 du GIEC, limitant ainsi grandement le potentiel de reforestation marine, notamment dans la mer Méditerranée avec l'herbier de Posidonie (31).

4.7. Roches et minéraux silicatées et carbonatés

En bref

Les méthodes d'altération accélérée ou d'alcalinisation de l'océan par voie minérale requièrent des roches alcalines et réactives. Les gisements identifiés en France sont résumés dans le tableau ci-dessous. Le commentaire détaille les hypothèses qui sous-tendent ces estimations.

Roches	Gisement théorique maximal (Mt/an)	Commentaire
Basalte	3	Estimation menée par Climerock à partir de sous-produits (fines) des mines de basalte actuellement en exploitation en France
Calcaire	5,2	3,0 Mt/an d'amendements agricoles et 2,2 Mt/an dû à une augmentation (pour l'EDC) de 10% de la production annuelle de calcaire (production totale actuelle de 22 Mt/an)
Olivine	3	Ouverture de mines dans l'étang de Lherez, le Tuc Desse, le Bois du Fajou, le Bois de la Pinouse et le Pic de Geral, pour exploiter entièrement le gisement d'olivine (env. 150 Mt), y compris le gisement difficile d'accès, sur une période de 50 ans
Dolomie	0,18	Augmentation de 10% de la production actuelle annuelle totale de dolomie (env. 1,8 Mt/an) pour faire de l'EDC
CKD	0,25	Augmentation de 10% de la production actuelle annuelle totale de CKD (env. 2,5 Mt/an) pour faire de l'EDC
Magnésite	0	Gisement français en magnésite inconnu
Wollastonite	0	Faibles gisements dans les Pyrénées, le Massif central et les Alpes mais non viables économiquement

Tableau 5 – Gisements théoriques maximaux en roches pour faire de l'EDC

Méthodologie

Les sources bibliographiques utilisées dans l'estimation du gisement sont principalement issues du BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière) :

- *Mémento - Carbonates calciques et magnésiens*, BRGM (2017)
- *Mémento - Roches et minéraux industriels - Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole*, BRGM (2000)
- *Mémento - Roches et minéraux industriels dolomie, magnésite et produits dérivés à usage industriel et agricole*, BRGM (1989)
- *Panorama du marché français des matériaux de carrière et produits dérivés*, BRGM (1999)
- *Mémento - Roches et minéraux industriels Wollastonite*, BRGM (1991)
- *Silicate production and availability for mineral carbonation*, P. Renforth (2011)
- *Le ciment en chiffres*, France Ciment (2022)
- *Caractérisation et utilisation de poussières de four de ciment CKD dans la stabilisation/solidification des déchets de l'unité BCR*, Faiza Khouan
- *Valorisation des déchets de four à ciment (CKD) de la cimenterie de Ain-Al-Kebira (Algérie) dans le Mortier*, Amar Guettouche (2019)

La méthodologie d'estimation des gisements théoriques maximaux en roches pour l'EDC est en quelques lignes présentée dans l'encadré ci-dessous.

Calcaire :

- Identifier le volume de calcaire actuellement utilisé pour faire de la chaux comme amendement agricole
- Supposer que les usines de production de chaux à partir du calcaire via la calcination sont équipées de CSC pour considérer l'épandage agricole de chaux comme négatif en termes d'émissions de GES
- Identifier le volume de calcaire produit annuellement actuellement en France
- Supposer une augmentation de 10% de la production actuelle annuelle de calcaire, pour faire de l'EDC
- Sommer les volumes de calcaire utilisés pour l'épandage et les volumes issues de l'augmentation de la production annuelle nationale pour avoir un gisement théorique maximal annuel de calcaire disponible pour l'EDC

Olivine :

- Identifier les gisements d'olivine en France (géographies et volumes)
- Supposer l'ouverture de mines pour exploiter ces gisements

Dolomie et CKD :

- Identifier la production annuelle française de dolomie et de CKD
- Supposer une augmentation de 10% de cette production afin de faire de l'EDC

Magnésite :

- Le gisement en magnésite est inconnu en France donc aucun gisement pour l'EDC n'a été considéré

Wollastonite :

- Identifier les gisements de wollastonite en France
- Considérer que les gisements sont trop petits et trop peu intéressants économiquement pour les exploiter afin de faire de l'EDC

Encadré 6 – Méthodologie pour estimer les gisements théoriques maximaux de roches pour faire de l'EDC en France

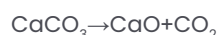
Basalte

En France, près de 80 carrières opérationnelles ont été recensées. La production moyenne des carrières est estimée à environ 150 000 tonnes/an, les plus grosses produisant plutôt des quantités de l'ordre de 500 000 tonnes/an. Ainsi, entre 10 et 15 millions de tonnes de basaltes sont produites chaque année de façon conservatrice. A noter par ailleurs, que la France a occupé en 2020 le 1^{er} rang en Europe (devant l'Allemagne, l'Italie et l'Autriche) en termes de production de granulats (25% de la production totale de l'UE), Source Eurostat, données 2022.

Sur cette quantité produite, il est estimé qu'entre 15 et 20% finissent en particules fines, co-produit du concassage. Ces coproduits sont tout indiqués pour l'EDC car déjà broyés et sans valeur dans le modèle économique actuel des carrières, et pourraient donc être fléchés vers de l'altération accélérée. Le gisement théorique est donc évalué à environ **3Mt** de basalte.

Calcaire

Concernant le calcaire, la valeur moyenne de production ces 25 dernières années est estimée à **22 Mt/an** avec les données disponibles (32)(33). En supposant une augmentation de 10% de cette production totale annuelle 2,2 Mt/an supplémentaires de calcaire serait disponibles pour l'EDC. Par ailleurs, des volumes importants de calcaire (3 Mt/an) sont actuellement utilisés en France pour produire de la chaux (CaO) par calcination, selon l'équation :



Cette chaux est ensuite épandue comme amendement sur les surfaces agricoles afin notamment de réguler l'acidité des sols. Le CO₂ libéré lors de la calcination n'est aujourd'hui pas capté et stocké. L'amendement agricole est donc émetteur de CO₂ aujourd'hui. Mais si le CO₂ était capté lors de cette calcination, l'épandage de chaux et d'oxyde de magnésium pourraient alors générer des émissions négatives. En supposant que toutes les usines de production de chaux soient équipées de CSC, l'amendement de chaux dans les champs permettrait de faire de l'EDC. Puisque le volume de calcaire utilisé aujourd'hui pour faire de la chaux comme amendement agricole est de 3 Mt/an, un gisement théorique de 3 Mt/an de calcaire serait ainsi également disponible pour l'EDC.

Au total, le gisement théorique maximal de calcaire utilisable pour l'EDC serait de **5,2 Mt/an**, c'est-à-dire la somme des 2,2 Mt/an de calcaire due à une augmentation de 10% de la production annuelle de calcaire et des 3 Mt/an due à l'ajout de CSC sur les usines de production de chaux comme amendements agricoles.

Olivine

La France ne produit pas aujourd'hui d'olivine sur son territoire (34), malgré plusieurs gisements d'olivine, notamment dans la lherzolite des Pyrénées (35). Ce gisement est estimé à 153 Mt, dont 88 Mt considérées par le BRGM comme facile d'accès, répartis entre le Pic de Géal, le bois de la Pinouse, et l'étang de Lherz. Les gisements du bois du Fajou et du Tuc Desse sont considérés comme plus difficiles. Il n'existe cependant pas d'étude montrant la viabilité économique de ce gisement d'olivine. D'autres gisements d'olivine existent en France, dans la vallée d'Aure, ou encore dans les autres mers, avec les basaltes à olivine de la Réunion, ou encore en Guadeloupe, mais sans gisement chiffré disponible (BRGM).

Une concession de mine est accordée pour une durée de 50 ans (code minier). Cette valeur est prise comme référence pour estimer la durée d'exploitation du gisement d'olivine. En supposant l'ouverture de mines dans l'étang de Lherz, le Tuc Desse, le Bois du Fajou, le Bois de la Pinouse et le Pic de Géal, l'exploitation du gisement total d'olivine d'environ 150 Mt sur 50 ans permettrait d'avoir un gisement théorique maximal d'environ **3 Mt/an** d'olivine pour faire de l'EDC.

Dolomie

Concernant la dolomie, la valeur moyenne de production de dolomie entre 1989 et 2015 avec les données disponibles est de **1,8 Mt/an** (36) (33). En supposant une augmentation de 10% de la production annuelle de dolomie afin de faire de l'EDC, un gisement théorique maximal de **0,18 Mt/an** de dolomie serait disponible pour l'EDC.

CKD

Les poussières de four de ciment, appelées « Cement Kiln Dust » (**CKD**) peuvent, tout comme les roches silicatées et carbonatées, servir à faire de l'altération accélérée terrestre ou de l'alcalinisation des océans par voie minérale. Ces poussières sont un mélange de plusieurs matériaux alcalins et silicatés comme la chaux (oxyde de calcium CaO) et le dioxyde de Silicium (SiO₂). Elles proviennent de la chauffe du calcaire à haute température dans un four, par exemple pour la production du ciment. Aujourd'hui, les CKD sont réinjectés dans les fours des cimenteries ou utilisées comme additif dans la construction de revêtement de routes comme stabilisant. A l'avenir, ce co-produit de la production de ciment pourrait être utilisé pour absorber du CO₂ via les méthodes d'EDC.

Chaque tonne de ciment fabriquée génère entre 150 et 200 kg de CKD (37). Or, la France produit chaque année en moyenne 16,5 Mt de ciment (38). En prenant un ratio conservateur de 150 kg de CKD par tonne de ciment, **2,5 Mt de CKD** seraient produites en France chaque année et pourrait théoriquement servir à de l'altération accélérée ou l'alcalinisation des océans par voie minérale. En supposant une augmentation de 10% de la production annuelle de CKD (2,5 Mt/an) pour de l'EDC, un gisement théorique maximal de **0,25 Mt/an** serait disponible pour faire de l'EDC.

Le CKD présente néanmoins quelques limites puisque dans certaines circonstances, ils peuvent nuire à la santé humaine et par extension à la biodiversité, si dispersé dans la nature (39) (40). Ces limites n'ont pas été prises en compte dans l'estimation du gisement théorique maximal de CKD disponible pour faire de l'EDC.

Magnésite

Concernant la **magnésite**, la France n'en est actuellement pas productrice, malgré une consommation annuelle de 192 kt en 1998 (36) (41). Le gisement total français n'est pas non plus disponible ni connu. Par manque d'information, aucun gisement théorique maximal de magnésite n'a été considéré dans ce rapport.

Wollastonite

Concernant la wollastonite, la France dispose de quelques indices (c'est-à-dire en faible quantité) de Wollastonite dans les Pyrénées, le Massif central, et les Alpes, mais leur exploitation seraient peu intéressants économiquement (42). Le gisement est donc considéré comme nul.

4.8. Stockage géologique de CO₂

En bref

Le gisement théorique de stockage de CO₂ en France est estimé à 27 GtCO₂. Cependant, peu de réservoirs ont fait l'objet d'études spécifiques et les capacités de sont donc pas encore toutes prouvées. En agrégeant les capacités prouvées par des études complémentaires, on obtient un gisement utilisable de 1100 MtCO₂ distribué entre le bassin parisien, l'Aquitaine et la vallée du Rhône.

4.8.1. Fonctionnement du stockage géologique de CO₂

Le stockage géologique de CO₂ consiste injecter le CO₂ capté dans des couches rocheuses sous-terraines qui présentent les caractéristiques nécessaires pour le piéger sur de longues périodes. C'est un maillon essentiel de la chaîne d'EDC car il permet de stocker durablement le CO₂ extrait de l'atmosphère et permet donc de générer de l'EDC permanente. Il existe différentes modalités de stockage géologique du CO₂.

Stockage en aquifères profonds : Les aquifères sont des formations de roches poreuses remplies de saumures. Ils sont généralement situés à plus de 800 m de profondeur. Les aquifères salins sont privilégiés pour le stockage de CO₂ car ils offrent des volumes importants et n'ont pas d'autres utilité (eau impropre à la consommation). Le CO₂ est injecté sous pression dans ces formations où il est stocké sous forme gazeuse (état supercritique) et dissoute dans l'eau salée. La présence d'une roche dite de couverture, étanche, est indispensable pour garantir un stockage durable.

Stockage en gisement de pétrole/gaz dépleted : Le CO₂ est injecté dans des réservoirs de gaz ou pétrole épuisés. Cette technique est déjà utilisée et donc maîtrisée dans des gisements actuels avec la récupération assistée du pétrole (EOR- CO₂).

Stockage en veines de charbon non exploité : Le CO₂ est injecté dans des veines de charbon non exploitées où il se lie à la surface du charbon.

Stockage par minéralisation : Le CO₂ est dilué dans de l'eau et injecté dans des roches alcalines poreuses (typiquement des basaltes ou péridotites). Le CO₂ dissout réagit naturellement avec la roche hôte et minéralise sous forme de minéraux carbonatés thermodynamiquement stables.

Les figures ci-dessous illustrent les différentes technologies de stockage géologique de CO₂.

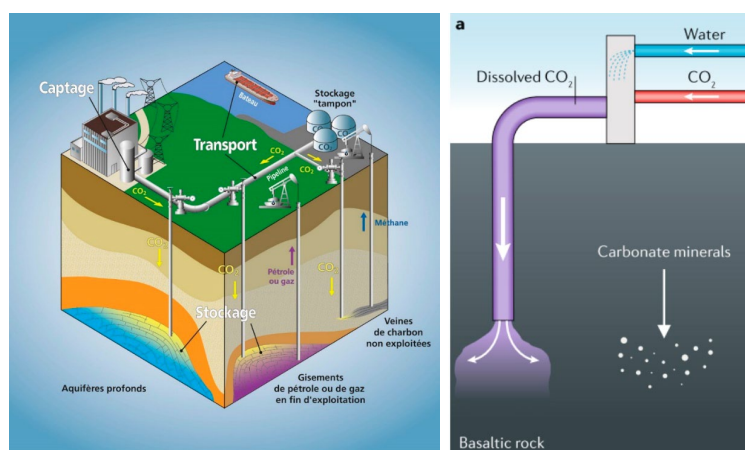


Figure 15 – Représentations schématiques des différentes formes de stockage géologiques de CO₂ :
panel de gauche reproduit de (43), panel de droite reproduit de (44).

De nombreuses publications détaillent le fonctionnement de cette méthode de stockage, ses risques, comment les gérer, ainsi que ses coûts et donnent des estimations du potentiel de stockage (45; 46).

4.8.2. Besoins de stockage de CO₂

En 2050, entre 20 à 100 MtCO₂/an devront être captées et stockées selon les scénarios contemplés par la SNBC2 (47). Les capacités de stockage de CO₂ doivent donc être étudiées pour permettre à la France de développer des capacités souveraines pour répondre à ses besoins. En effet, même s'il est envisageable d'exporter une partie du CO₂ capté vers les pays riverains de la mer du nord, qui ont déjà pris de l'avance dans le développement de leurs réservoirs, les études montrent que cela ne sera pas suffisant pour satisfaire les besoins de tous les pays européens, et qu'il est essentiel que tous les pays développent leur propres réservoirs pour que l'espace de stockage soit suffisant, mais aussi pour réduire les besoins d'infrastructures de transport (48).

4.8.3. Gisement théorique

En 2010, le gisement de stockage de CO₂ en France est estimé à 27 GtCO₂ avec le projet Metstor (49). Ce chiffre est un maximum théorique qui doit être confirmé par des études approfondies et locales sur chaque réservoir, ces derniers étant répartis sur plusieurs zones géographiques comme illustré sur les figures ci-dessous. Parmi eux, le stockage offshore dans des couches sédimentaires de la mer Celtique et du golfe de Gascogne représenterait environ 10 GtCO₂ dans la ZEE française (~10 GtCO₂ supplémentaires hors de la ZEE) (50) Figure 16.

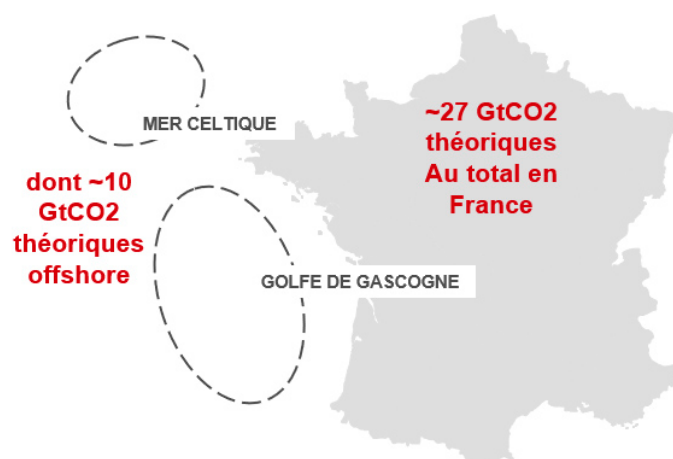


Figure 16 – Capacités de stockage théoriques en France métropolitaine

4.8.4. Gisement affiné après études

Il n'existe pas en France de capacités « prouvées » mais seulement « probables » que des études complémentaires et des premiers projets devront démontrer. Une capacité devient prouvée quand une étude géologique spécifique confirme le volume préalablement estimé.

Les réservoirs de gaz/pétrole déplétés sont bien connus, puisqu'on maîtrise le volume extrait de ses derniers, et on peut en déduire le volume a priori minimal disponible pour l'injection de CO₂. C'est le cas du bassin parisien dont la capacité est estimée à 65MtCO₂.

Sur la Figure 17 ci-dessous, est représenté la carte du gisement de stockage CO₂ selon les dernières études réalisées, et selon les données issues de la production pétrolière (conservatrices) (51).

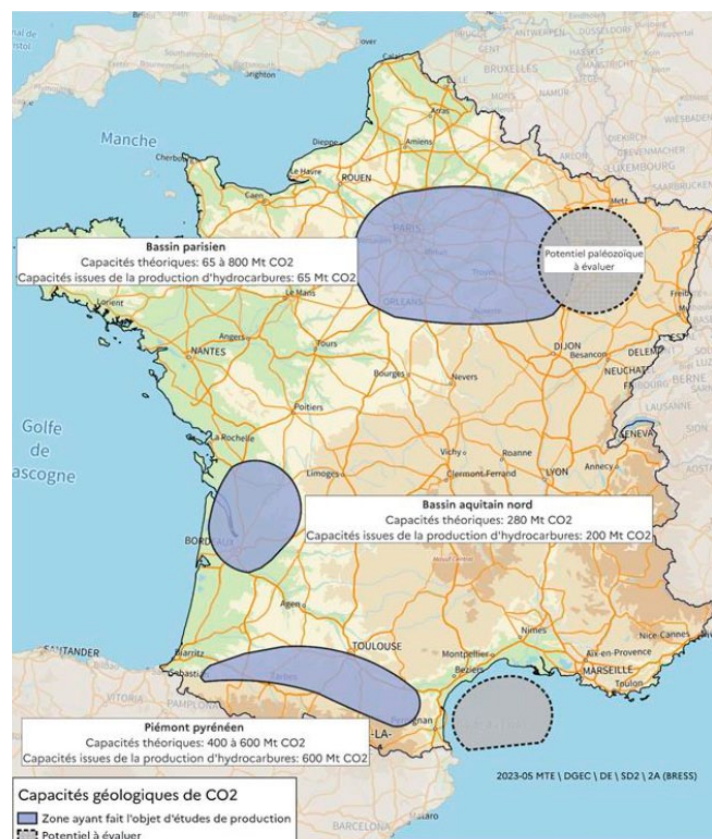


Figure 17 – Capacités géologiques de CO₂ en France métropolitaine estimées
(Source : ministère de la transition écologique)

Des études plus spécifiques ont notamment été réalisées dans le Bassin parisien, et dans le piémont pyrénéen, permettant d'affiner les estimations théoriques.

4.8.5. Piémont pyrénéen : Lacq

Le projet PYCASSO, lancé en 2021, a pour objectif d'évaluer le gisement de stockage CO₂ du bassin aquitain qui repose sur la réutilisation de réservoirs déplétés. Ce gisement est voué à répondre aux besoins des projets de CSC des industries émettrice de CO₂ de Lacq, du sud-Ouest de la France et du nord de l'Espagne. Il a été estimé que le gisement de Lacq représenterait à lui seul, une capacité de stockage de 500 MtCO₂ (52). La phase 1 du projet prévoit d'injecter 1 à 3 MtCO₂/an à horizon 2030, et 5 MtCO₂/an pour la phase 2 à partir de 2035. Ceci est cohérent avec les estimations précédentes gouvernementales de 600 MtCO₂ potentiels dans le piémont pyrénéen (51).

4.8.6. Bassin parisien

Une étude récente réalisée avec le BRGM, précise le potentiel de stockage de trois différents gisements du Bassin parisien (53). Voir Figure 18 ci-dessous.

- 140 MtCO₂ pour le Keuper Sud
- 81 MtCO₂ pour le Keuper Nord
- 165 MtCO₂ pour le Dogger

Ainsi, le Bassin parisien pourrait permettre de stocker ~400 MtCO₂ en attendant d'autres études permettant de préciser le potentiel d'autres unités.

4.8.7. Vallée du Rhône

L'étude VASCO « Valorisation et Stockage du CO₂ » réalisée en 2012 par le BRGM estime une capacité de stockage pour l'aquifère de Saintes-Maries-de-la-Mer comprise entre 80 MtCO₂ et 180 MtCO₂. Soit une capacité retenue d'environ 100 MtCO₂. (54).

4.8.8. Gisement de stockage total

Malgré les incertitudes élevées sur la capacité des différents gisements de stockage du CO₂, la Figure 18 donne une vision agrégée des différents gisements de stockage français calculés à partir d'études spécifiques. En sommant les gisements, on obtient une **capacité totale de stockage de ~1100MtCO₂**.

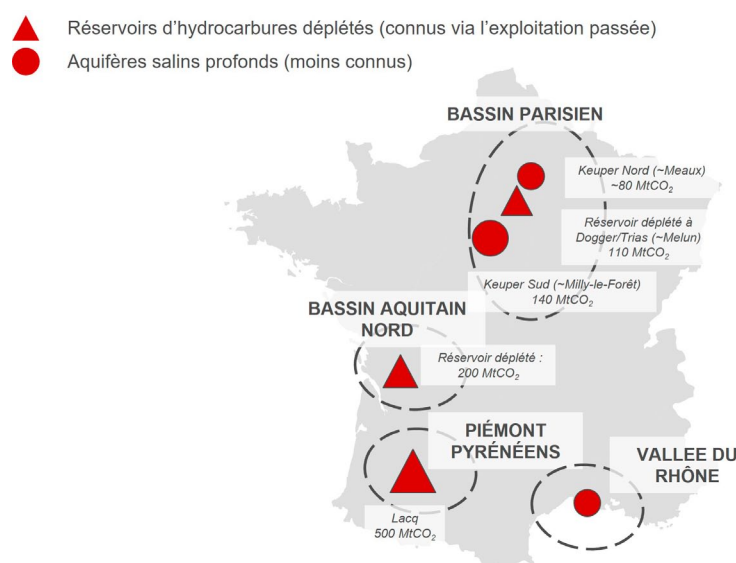


Figure 18 – Capacités de stockage du CO₂ onshore identifiées en France en 2022 (en MtCO₂)

D'autres études à l'avenir permettront de prouver certaines capacités pour l'instant estimées, notamment en offshore dans la zone Celtique et Golfe de Gascogne, où théoriquement 10 GtCO₂ pourraient être stockées dans des formations sédimentaires

4.9. Transport de CO₂

4.9.1. Fonctionnement

Plusieurs modalités de transport existent pour transporter le CO₂ au sein du territoire : par canalisation (pipeline), ou par transport routier, ferroviaire, fluvial ou maritime. Lors de son transport, le CO₂ est soit comprimé, soit liquéfié (comme c'est le cas pour l'H₂ ou le CH₄). Il peut ensuite être exporté par voie maritime vers des zones de stockage comme en mer du Nord, avec des terminaux de liquéfaction faisant l'interface entre le CO₂ gazeux des canalisations, et le CO₂ liquéfié des navires. Les navires-citernes (tankers) transportant du GPL aujourd'hui pourraient par exemple servir au transport maritime du CO₂ (55), avec tout de même des contraintes techniques : en présence d'humidité le CO₂ devient par exemple corrosif.

4.9.2. Besoins en transport de CO₂

La stratégie CCUS française prévoit le développement du transport de CO₂ en parallèle de la mise en place de la CCUS, qui sera mis en œuvre dans les prochaines années pour réduire les émissions GES françaises. Elle prévoit que les volumes de CO₂ captés par la CCUS pourraient, à horizon 2030, atteindre 4 à 8,5 MtCO₂/an, et entre 15 et 20 MtCO₂ en 2050 pour le secteur industriel. Cependant, elle n'inclut pas les besoins de transport du CO₂ issus des méthodes d'EDC qui requièrent un stockage du CO₂ comme la BECSC, la DACCS, ou la DOCSC (51). Elle indique qu'à court terme, les infrastructures de transport du CO₂ devront être développées au niveau des clusters industriels, et des hubs d'export du CO₂. Ainsi, pour bénéficier des infrastructures de transport de CO₂, les méthodes d'EDC comme la BECSC et la DACCS devront être développées de manière privilégiée à proximité de ces zones industrielles.

4.9.3. Stratégie française et projets

A court terme, la stratégie française prévoit de privilégier :

- Le développement de pipelines dans les bassins industriels de Dunkerque, l'axe Seine et l'axe du Rhône.
- Le développement des terminaux de liquéfaction « Hubs CO₂ » au niveau des grands ports pour exporter le CO₂ capté vers les sites de stockage géologique matures et disponibles dès aujourd'hui (notamment en mer du Nord)
- Pour les sites isolés, le développement du transport fluvial et ferroviaire.

A moyen terme et jusqu'en 2035 environ, il existe en France plusieurs projets de transport de CO₂, tous liés à un projet de CSC. Ces projets sont répartis selon trois phases de déploiement (51).

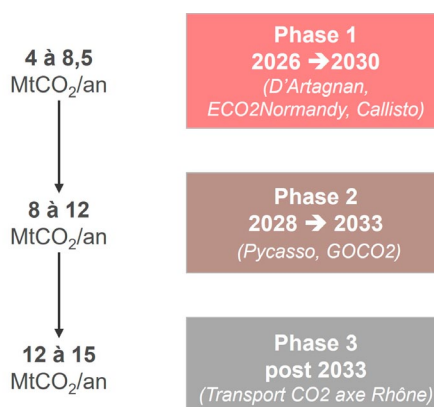


Figure 19 – Différentes phases de déploiement des projets français CCUS, et leurs besoins de transport de CO₂ associés

Phase 1 (2026–2030) :

- **Projet D'Artagnan** : La zone industrielle de Dunkerque s'associe autour du projet d'Artagnan prévoyant de capter, puis de liquéfier et d'exporter vers la mer du Nord 3 à 4 MtCO₂/an à horizon 2030.
- **Projet ECO2Normandy** : Au niveau du Havre et de la vallée de la Seine, ce projet vise à rendre possible le transport de CO₂ sur la Seine, et ainsi d'envisager la CSC ou l'EDC (BECSC ou DACCS) sur certains sites isolés de la Seine. Ce CO₂ sera ensuite liquéfié dans le hub CO₂ du Havre, d'où il sera exporté vers la mer du Nord.
- **Projet CALISTO (Carbon Liquefaction transportation and STORAGE)** : Développement d'un hub CO₂ à Marseille, qui collectera le CO₂ provenant de la vallée du Rhône par voie fluviale, ou par pipeline si une canalisation existante pouvait être réutilisée. Le CO₂ sera ensuite liquéfié et envoyé par navire vers le hub de Ravenne en Italie qui collectera ce CO₂ puis le renverra en direction du site géologique d'enfouissement offshore de la mer Adriatique (56).

Phase 2 (2028–2033) :

- **Projet PYCASSO (PYreanean CO₂ Abatement through Sustainable Sequestration Operations)** : Ce projet vise dans une première phase entre 2030 et 2034, à transporter et stocker les émissions CO₂ industrielles de Lacq, du sud-ouest de la France et du nord de l'Espagne, via des pipelines dédiés, complétés par des segments de transport maritime et ferroviaire. Le CO₂ sera stocké dans les capacités de stockage évoquées précédemment de Lacq. Le projet prévoit de transporter jusqu'à 2,5 MtCO₂/an entre 2030 et 2034.
- **Projet GOCO2** : quatre industriels majeurs, incluant cimentiers et raffineurs de l'estuaire de la Loire vont, à partir de 2030, recourir à la CSC, et capter ~1,5 MtCO₂/an en 2033. Le CO₂ sera transporté vers le hub du port de Nantes-Saint-Nazaire par pipeline, puis exporté par voie maritime vers des sites de stockage encore non définis.

Phase 3 (à partir de 2033) :

- **Projet PYCASSO (PYreanean CO₂ Abatement through Sustainable Sequestration Operations)** : A partir de 2035, le projet Pycasso va s'étendre aux émetteurs de CO₂ du nord et du sud (en Espagne entre Saint Sébastien et Bilbao) de la plateforme de stockage. Pour acheminer ce CO₂, un pipeline nord, ainsi qu'un pipeline transfrontalier sud sera utilisé. Le projet prévoit de transporter dans cette seconde phase jusqu'à 3,4 MtCO₂/an supplémentaire soit jusqu'à ~6MtCO₂/an.
- **CSC dans le Grand Est** : A partir de 2033, le déploiement de la capture et du stockage du carbone (CSC) est envisagé dans la région Grand Est. Le stockage se fera soit à terre dans les capacités nationales, soit en se raccordant à un réseau de transport CO₂ prolongeant l'axe Rhône à une échelle Européenne (51).

Tous ces projets sont liés à des émissions de CO₂ industriel. Il est donc possible d'envisager de réaliser de la BECSC, ou de la DACCS, dans ces mêmes bassins industriels, pour ainsi bénéficier des infrastructures de transport et d'export du CO₂.

4.9.4. Conclusion vis-à-vis de l'EDC

Le transport du CO₂ est un maillon essentiel de la chaîne CCUS et pour certaines méthodes d'EDC comme la BECSC, la DACCS, ou la DOCSC, nécessitant un stockage géologique du CO₂ capté. Ainsi, ces technologies devront être mises en place à proximité des infrastructures de transport de CO₂ existantes, notamment les pipelines, ainsi que les terminaux de liquéfaction pour l'exportation maritime du CO₂. Les infrastructures de DACCS et DOCSC inexistantes aujourd'hui peuvent être construites à l'endroit le plus opportun, directement à proximité d'un raccordement électrique et d'une infrastructure de transport de CO₂. En revanche, les unités de BECSC ne peuvent être réalisées que sur de grandes unités (centrales biomasse par exemple), qui existent déjà aujourd'hui pour la plupart, et qui sont potentiellement situées dans des zones géographiques éloignées d'un réseau de transport de CO₂. La BECSC sera donc à privilégier dans les zones géographiques proches des bassins industriels, où existeront dans les prochaines années des infrastructures de transport de CO₂ pour gérer le CO₂ capté par les solutions CCUS.



4.10. Vision globale du besoin en ressource

Chaque méthode d'EDC nécessite une ou plusieurs ressources physiques différentes. Il s'agit donc de déterminer laquelle de ces ressources physiques est limitante dans sa mise en œuvre, pour baser l'estimation du potentiel maximal sur celle-ci. C'est ce qui est décrit dans la Figure 20 avec en rouge les ressources qui seront limitantes pour la méthode concernée.

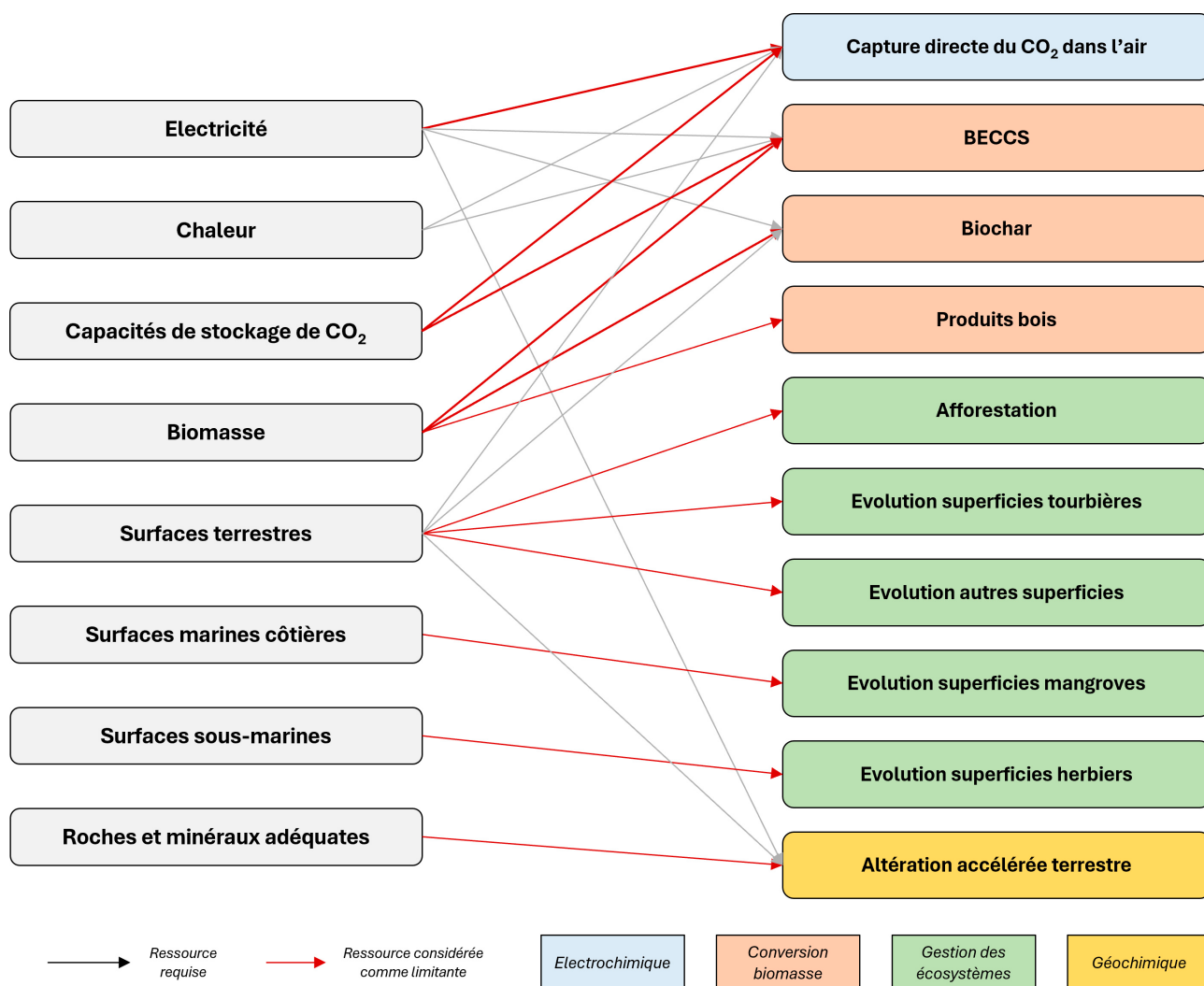


Figure 20 – Illustration des liens de dépendance entre ressources nécessaires et méthodes d'EDC (non exhaustive)

5. Cadre réglementaire et juridique concernant l'EDC

5.1. Introduction

La France a commencé à étudier le rôle de l'EDC dans le cadre de son objectif de neutralité climatique à long terme, à savoir atteindre la neutralité climatique en 2050, mais en examinant principalement les méthodes d'EDC basées sur les terres et la biomasse. Avec son Label bas-carbone, la France a en outre établi un cadre de certification applicable à une série de méthodes d'élimination du carbone.

Au moment de l'écriture de ce rapport, la France est en train de réviser sa stratégie énergétique et climatique, y compris la nouvelle *loi de programmation sur l'énergie et le climat*, qui définira les objectifs de réduction des émissions de GES pour trois périodes successives de cinq ans (à priori 2023-2028) et les objectifs énergétiques nationaux pour deux périodes successives de cinq ans (à priori 2023-2033). Prévue dans la loi énergie-climat de 2019, cette loi devrait fixer les grands objectifs de la nouvelle PPE 3 (2024-2033) et de la nouvelle SNBC 3. Cette loi aurait dû être adoptée en juillet 2023 mais n'a finalement pas encore été présentée au moment de la rédaction de ce rapport.

La PPE actuelle concerne la période 2019-2028 et a été définitivement adoptée le 21 avril 2020. La PPE doit être compatible avec les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre fixés par les budgets carbone, en particulier pour le secteur de l'énergie, ainsi qu'avec la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC).

5.2. Cadres juridiques pertinents

Cadre juridique des politiques climatiques nationales

Le « décret n° 2020-457 du 21 avril 2020 relatif aux budgets carbone nationaux et à la stratégie nationale bas-carbone » fixe les budgets carbones d'émissions de GES annuelles à respecter par la France. Ces budgets ont été réajustés en juillet 2022 à la suite d'un changement de méthodologie d'inventaire d'émissions par le CITEPA (57). Ces budgets sont :

MtCO ₂ eq/an	2e budget carbone (2019-2023) ajusté	3e budget carbone (2024-2028) ajusté	4e budget carbone (2029-2033) ajusté
Transports	129	113	94
Bâtiments	77	59	72
Agriculture/Sylviculture	80	75	70
Industrie	75	65	53
Production d'énergie	48	35	30
Déchets	12	10	9
Total hors UTCATF	421	358	299
UTCATF	-38	-38	-41
Total avec UTCATF	383	320	258

Tableau 6 – Budgets carbone de la France ajustés en juillet 2022 (57)

En complément, la SNBC 2 adoptée en 2020 fixe des objectifs de baisses des émissions de GES et propose une trajectoire pour parvenir à la neutralité carbone en 2050.

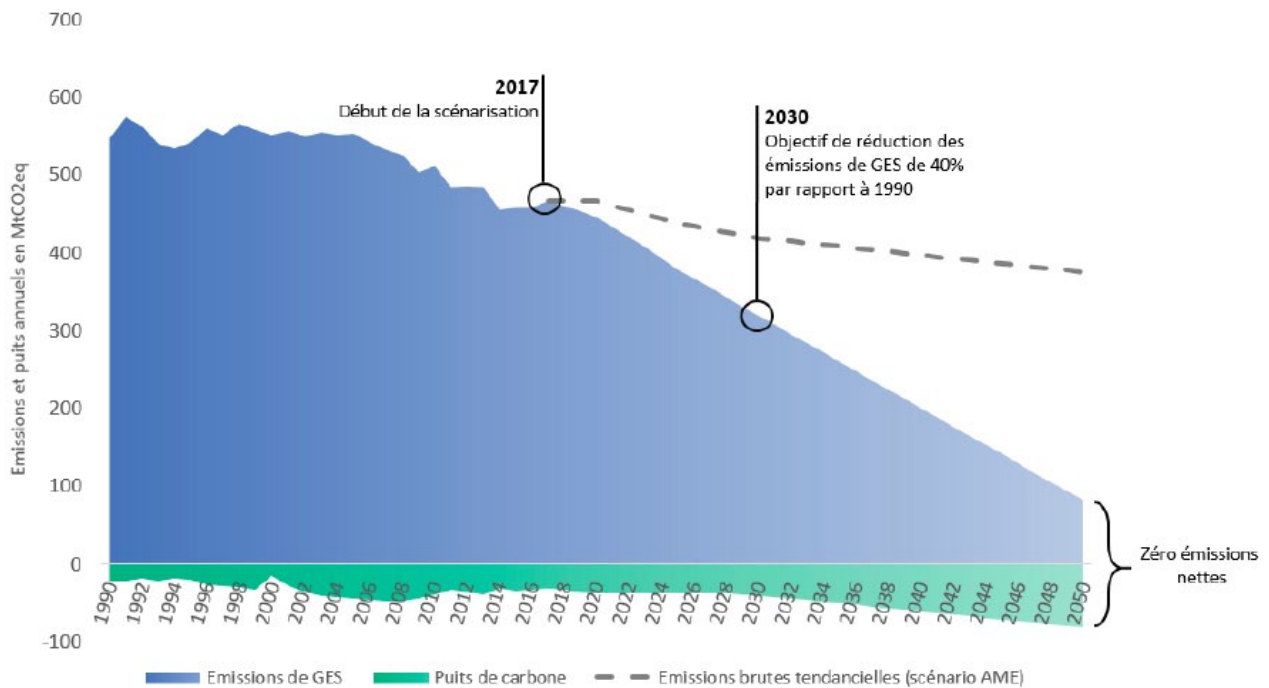
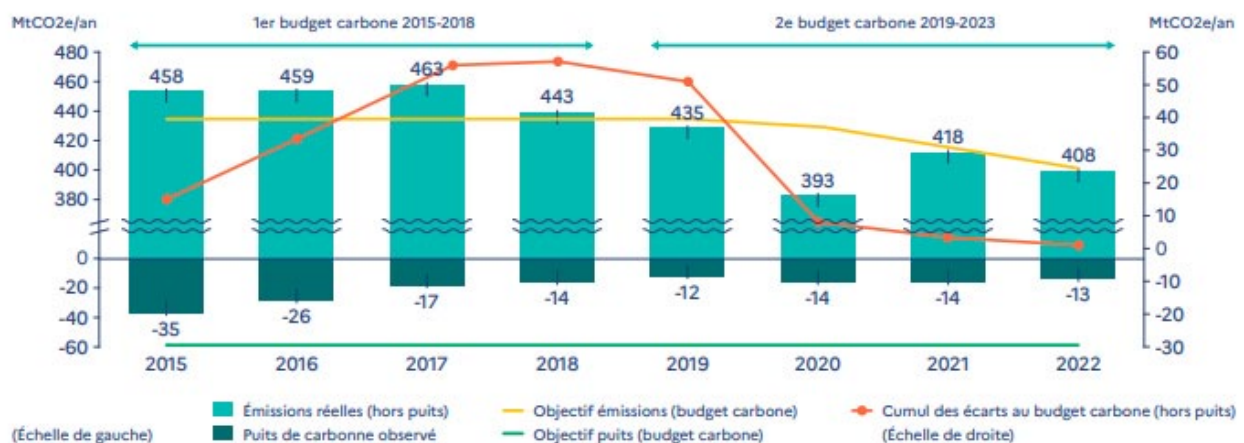


Figure 21 – Evolution des émissions et des puits de GES sur le territoire national entre 2005 et 2050 selon la SNBC 2

Plus récemment, le SGPE (Secrétariat Général à la Planification Ecologique) a annoncé en septembre 2023 l'objectif de réduction des émissions annuelles de GES de 55% entre 2030 et 1990, soit une baisse des émissions de 4 à 5% par an (58). Par ailleurs, il précise que le premier budget carbone (2015-2018) n'a pas été respecté tandis que le second budget (2019-2023) est pour l'instant respecté.



Le retard cumulé de la 1^{ère} période est presque compensé par de moindres émissions lors de la 2^{ème} période

Source : Citepa

Figure 22 – Respect des budgets carbone 2015-2018 et 2019-2023 de la France (58)

L'engagement climatique de la France correspond à celui de l'Union Européenne d'atteindre la neutralité carbone en 2050 et de diminuer ses émissions d'au moins 55% entre 2030 et 1990 à la suite du paquet « Fit for 55 ». L'objectif de neutralité carbone est inscrit dans la « *Regulation (EU) 2021/1119* ».

Cadre juridique pertinent pour les méthodes d'EDC :

En France, un **Label bas-carbone** a été introduit en 2018. Il s'agit du système de certification officiel de la France pour les projets de réduction ou de séquestration des gaz à effet de serre réalisés sur son territoire. Il apporte des règles claires et de la transparence au marché volontaire national du carbone en introduisant un cadre pour la surveillance, la déclaration et la vérification des réductions d'émissions de gaz à effet de serre ou des émissions négatives de carbone afin d'encourager de tels projets. Le label repose sur des méthodes de réduction des émissions ou d'élimination du carbone approuvées par le ministère français de la transition écologique. En octobre 2023, 726 projets au total ont reçu le label et 151 projets ont été financés à 100% via ce label.

Au niveau européen, la directive CCS de 2009 donne un cadre pour les activités de transport et de stockage de CO₂. L'UE s'apprête par ailleurs à développer son cadre de certification de l'élimination du carbone appelé « Carbon Removal Certification ». Ce cadre précise qu'il existe plusieurs façons d'éliminer et de stocker le carbone et qu'elles pourront toutes être certifiées dans le cadre de l'UE, notamment :

- Les solutions fondées sur la nature, telles que la restauration des forêts et des sols et les pratiques agricoles innovantes : Carbon farming
- Les produits et matériaux durables, tels que les constructions à base de bois
- L'EDC permanente, telles que la bioénergie avec piégeage et stockage du carbone ou la capture directe dans l'air

A la date de rédaction de ce rapport, la proposition de la Commission Européenne sera bientôt discutée avec le Parlement Européen et le Conseil.

Par ailleurs, le CO₂ capturé et stocké (CSC) n'est actuellement pas considéré comme « émis » dans le système ETS. En effet, depuis l'amendement de la « Emissions Trading Directive » en 2015, les infrastructures de capture, de transport et de stockage de CO₂ sont explicitement incluses dans les ETS (59). Le système ETS favorise donc la CSC mais ne valorise pas actuellement le stockage de CO₂ biogénique sous forme de quotas « négatifs ».

En revanche, les objectifs de réduction des émissions de GES pour l'aérien (-61% d'émissions de GES entre 2030 et 2005) et le maritime (-80% d'émissions de GES par unité d'énergie consommée par navire dans Refuel EU Maritime) vont créer une demande en carburants durables synthétiques produits à partir de CO₂ biogénique et d'hydrogène vert/bleu. Cela pourrait en conséquence inciter les acteurs industriels à capter puis vendre le CO₂ biogénique pour faire des électro-carburants au lieu de l'enfouir dans des cavités géologiques pour faire de la BECSC. Une compétition d'usage entre le CO₂ biogénique pourrait ainsi apparaître entre la BECSC et la production d'électro-carburants.

5.3. Rôle de l'EDC dans la politique nationale

La **stratégie nationale bas-carbone (SNBC 2)** fixe l'objectif de parvenir à des émissions nettes nulles d'ici 2050 et propose des projections d'émissions et d'élimination de gaz à effet de serre (GES) pour 2050, en partant du principe que la France émettra annuellement environ 80 millions de tonnes (Mt) de CO_{2eq} et que les puits de GES absorberont un peu plus de 80 Mt de CO_{2eq} chaque année (en incluant la CSC général dans la prise en compte des puits). En détails, la stratégie prévoit que d'ici 2050, environ 30 Mt d'émissions négatives de CO_{2eq} seront générées annuellement par les forêts, 21 MtCO_{2eq}/an par les produits bois, 15 MtCO_{2eq}/an pour la CSC (BECSC incluse) et 12 MtCO_{2eq}/an pour les autres terres. Ces objectifs chiffrés pourraient évoluer avec l'élaboration et l'adoption de la SNBC 3.

La SNBC 2 fait notamment plusieurs recommandations concernant la séquestration du carbone dans les sols comme (page 190) :

- Préserver les prairies permanentes
- Développer largement l'agroforesterie
- Augmenter les restitutions au sol de résidus de cultures et de matières organiques de qualité
- Développer les pratiques culturales agroécologiques favorables à la séquestration de carbone, combinant notamment la réduction du travail du sol, sa couverture permanente et l'allongement des rotations de culture, ainsi que le développement des banques enherbées
- Préserver les milieux agricoles humides

Concernant les forêts, la SNBC 2 recommande également de (page 191) :

- Développer le boisement, tout en tenant compte des enjeux écologiques des terrains renouvellement boisés (préservation de la biodiversité, aspects paysagers...)
- Préserver les surfaces forestières en réduisant les défrichements
- Diminuer les risques de dégâts liés à des aléas naturels (tempêtes, incendies, sécheresses, attaques phytosanitaires...) par une gestion sylvicole améliorée visant l'adaptation des forêts au changement climatique

Concernant la CSC et la CCU, la SNBC 2 adoptée en 2020 recommande de « *soutenir les développements d'unités pilotes et éventuellement commerciales en capture et stockage du carbone (CSC) et en capture et utilisation du carbone (CUC) avec l'utilisation du CO₂ comme matière première dans la fabrication de carburants ou de produits chimiques* ». Elle recommande également de soutenir fortement l'usage de CSC avec les unités de bioénergies pour « *générer des émissions négatives* » (page 191). Cependant aucun mécanisme incitatif n'a été mis en place depuis pour la BECSC.

Les recommandations de la SNBC 2 sont précisées par la stratégie CCUS présentée par le gouvernement en juin 2023 qui indique que « *les technologies CCUS sont une partie de la solution. Elles doivent permettre de capter les émissions résiduelles incompressibles des industriels ; elles apportent un levier là où les solutions de décarbonation n'existent pas ; elles permettent d'accélérer en captant les émissions de carbone le temps que l'industriel puisse mettre en œuvre des solutions plus pérennes* ». Un potentiel d'élimination de carbone est estimé : **4 à 8 MtCO_{2eq}/an à horizon 2030** et entre **15 et 20 MtCO_{2eq}/an à horizon 2050**. Ce chiffre de 15 à 20 MtCO_{2eq}/an en 2050 est cohérent avec les objectifs de la SNBC 2 de capture de 15 MtCO_{2eq}/an par CSC en 2050.

Dans un futur proche :

Prévue dans la loi énergie-climat de 2019, la *loi de programmation sur l'énergie et le climat (LPEC)* est en cours de discussion et devrait être votée prochainement. Celle-ci aurait dû être votée en juillet 2023 mais a été repoussée à la suite d'un agenda parlementaire chargé. Cette nouvelle loi devrait fixer les grands objectifs de la nouvelle PPE 3 (2024-2033) et de la nouvelle SNBC 3.

Suite à l'adoption de la LPEC, une nouvelle itération de la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC3) devrait suivre, ainsi que du prochain cadre pluriannuel de l'énergie (PPE 3, 3e itération pour 2024-2033) qui définira les outils de gestion de la politique énergétique, et de la Politique nationale d'adaptation au changement climatique révisée (PNACC 3, 3e itération). Ces initiatives législatives fourniront des feuilles de route techniques pour la mise en œuvre du SFEC et du LPEC.

Un autre développement potentiellement pertinent pour l'EDC est la loi « Industrie verte » soutenue par le ministre des Finances et adoptée en juillet 2023. Cette loi vise notamment à soutenir les technologies vertes grâce au crédit d'impôt « investissements industries vertes », à soutenir la décarbonation des industries existantes et à mobiliser l'épargne privée pour financer l'industrie verte. A ce titre, le projet de loi Industrie Verte rappelle que France 2030 prévoit d'investir 5,6 milliards d'euros de subventions consacrés à la décarbonation de l'industrie. En revanche, les technologies CSC, CCU et plus largement les solutions EDC ne sont pas évoquées dans le document.

5.4. Soutien à la R&D et à l'innovation

Vision française

Le **label bas-carbone** peut encourager la réduction des émissions de gaz à effet de serre basée sur les écosystèmes (en améliorant les puits naturels). Les méthodes d'EDC telles que le biochar et l'amélioration de l'altération climatique pourraient potentiellement bénéficier de ces incitations, mais les méthodes de certification doivent encore être développées (la structure du Label bas-carbone permet l'intégration de nouvelles méthodes de certification sur une base continue).

Un financement supplémentaire est prévu dans le cadre de la stratégie « **France 2030** ». Dans le cadre de ce plan, trois milliards d'euros seront mis à disposition pour décarboniser l'industrie avec la CSC et pour les startups deeptech/frontier. L'EDC peut correspondre à la description de l'innovation technologique visée par la stratégie, mais elle n'est pas explicitement ciblée.

Vision européenne

A l'échelle européenne, d'autres soutiens à la R&D et à l'innovation pour l'EDC existent.

Selon le document « **The State of Carbon Dioxide Removal** » (2023), « Dans le cadre de son initiative sur le cycle durable du carbone, la Commission prévoit d'accroître les **incitations** pour toutes les méthodes d'EDC basées sur l'UTCATF (sous le terme d'agriculture du carbone), de développer le **soutien à l'innovation** dans les méthodes d'EDC basées sur le captage et le stockage du carbone (CSC), telles que BECSC et le captage et le stockage du carbone dans l'air direct (DACCS), et d'établir un **cadre de certification** pour un large éventail de méthodes de réduction des émissions de gaz à effet de serre (EDC) ».

Le Fonds européen pour l'innovation (alimenté par les recettes du système d'échange de quotas d'émission de l'UE) est jusqu'à présent le principal outil pour soutenir le développement de nouvelles technologies d'EDC, complété par un financement dans le cadre du **programme de recherche et d'innovation de l'UE (Horizon Europe)**.

A ce titre, la Commission Européenne a annoncé en avril 2022 cofinancer un projet de démonstration d'EDC (BECSC Stockholm) à hauteur de 180 M€ par le **Fonds européen pour l'innovation**, en plus des projets qui entrent dans la catégorie plus large de la "gestion du carbone" (c'est-à-dire le captage et le stockage du carbone), qui façonneront l'expansion future de l'EDC. Ce projet capturera et stockera les émissions en sortie d'une centrale biomasse à Stockholm à hauteur de 0,8 MtCO_{2e}/an.

Le deuxième mécanisme de financement de l'EDC à l'échelle de l'UE est **Horizon Europe**, le programme de l'UE pour la recherche, le développement et l'innovation. Ce programme soutient diverses méthodes d'EDC. Par exemple, le projet "3D" à Dunkerque, dans le cadre du programme de recherche **Horizon Europe**, vise à démontrer l'efficacité d'un procédé innovant de captage du CO₂ issu des activités industrielles. Ce projet s'inscrit également dans la nouvelle stratégie de décarbonation française visant à diviser par deux les émissions de 50 sites industriels parmi les 120 plus gros émetteurs de carbone en France au cours des dix prochaines années.

Par ailleurs, **en Allemagne**, le gouvernement soutient aussi certains projets. Selon le document « **The State of Carbon Dioxide Removal** » (2023), « Depuis 2021, le ministère fédéral allemand de l'éducation et de la recherche a financé deux grandes missions de recherche majeures : l'une sur les méthodes d'EDC basées sur les océans et les méthodes de stockage marin du CO₂ (CDR_{mare}) et l'autre sur les méthodes d'EDC terrestres (CDR_{terra}). **CDR_{mare}** a commencé à financer six projets en 2021 pour un montant total de 26 millions d'euros. **CDR_{terra}** a commencé à financer des projets sur la DACCS, le biochar, l'amélioration de l'altération des roches, la BECSC et le boisement/reboisement, d'une valeur totale de 21 millions d'euros ».



5.5. Les acteurs de l'EDC

En France, bien que les soutiens manquent et que le gouvernement peine à définir une stratégie claire pour l'EDC, un écosystème de chercheurs, d'entrepreneurs, d'investisseurs et de think tanks se développe progressivement. La Figure 23 donne un aperçu de cet écosystème au moment de la rédaction de ce rapport.



Figure 23 – Cartographie des acteurs de l'EDC en France

Parmi les fournisseurs d'EDC, la plupart des entreprises sont encore très jeunes même si on voit apparaître certains grands groupes comme Suez par exemple. L'écosystème couvre déjà la majorité des méthodes même si celles basées sur la gestion des écosystèmes sont le plus représentées.

Des grandes entreprises françaises font partie des gestionnaires de CO₂, notamment sur des compétences de capture, liquéfaction, transport et stockage. Les compétences plus nouvelles de transformation/valorisation du CO₂ sont représentées par des entreprises plus jeunes comme Dioxycle ou Sinko Labs.

Parmi les intermédiaires de marché, on retrouve des acteurs incontournables au niveau international comme Puro ou Patch, avec d'autres qui opèrent depuis la France comme CarbonX et Reverse. Les investisseurs français sont encore rares à se positionner sur l'EDC.

Enfin pour ce qui est des deux dernières catégories, recherche et fédération/think tank, les organisations listées approchent le sujet de l'EDC par des angles très différents, certaines de façon très tangentielle, alors que d'autres sont spécialisées sur ce sujet. De plus en plus d'organisations s'intéressent à l'EDC et ces deux catégories ont grossi rapidement au cours des dernières années.

6. Potentiel théorique maximal d'EDC

6.1. Méthodologie d'allocation des ressources pour les méthodes d'EDC

La partie 4 de ce rapport a permis d'évaluer les gisements maximaux de ressources utilisables en France pour les différentes méthodes d'EDC. Dans cette partie 6, le potentiel **théorique maximal** d'EDC est calculé en considérant que l'intégralité des gisements disponibles (mais qui préservent les usages prioritaires), est employée pour l'EDC. Cette approche est tout à fait **théorique**, et ne représente pas la réalité, beaucoup plus complexe, et où il pourrait y avoir une compétition d'autres secteurs d'activités pour ces ressources supplémentaires. Mais le potentiel théorique est un point de référence utile aux arbitrages réalisés plus loin pour définir le potentiel réalisable. Il permet de donner un ordre d'idée du déploiement maximal d'EDC dans un contexte différent, par exemple si la société engageait un « effort de guerre » pour stopper le changement climatique.

Calcul du potentiel théorique d'EDC

Pour évaluer le potentiel théorique d'EDC, il est nécessaire d'estimer le gisement de ressource allouable à chaque méthode d'EDC. Chaque méthode d'EDC nécessite souvent plusieurs ressources indépendantes telles que de l'électricité, de l'eau, de la chaleur, etc. On hiérarchise d'abord les différentes méthodes d'EDC utilisant les mêmes ressources. C'est notamment le cas pour les différents types de DACCS, la DOCCS, et les méthodes géochimiques (broyage) qui requièrent toutes de l'électricité. Une fois cette priorisation faite, il est possible de définir la **ressource limitante** qui sera **dimensionnante** pour le potentiel de chaque méthode d'EDC.

Les critères d'allocation de l'électricité et de la chaleur sont : en premier lieu le coût de la technologie, et ensuite son rendement énergétique. Les technologies les moins chères seront les plus susceptibles de se développer et sont donc priorisées. Ensuite, c'est le rendement énergétique qui détermine la priorité d'allocation, pour privilégier les méthodes les moins consommatrices d'électricité par tonne de CO₂ absorbée.

Des contraintes techniques sont également à prendre en compte, comme dans le cas de la L-DACCS qui requiert des températures entre 300 et 900 °C, incompatibles avec le gisement de chaleur fatale (<300°C pour l'immense majorité du gisement). Cette technologie est donc exclue de l'exercice d'allocation du gisement et ne sera pas retenue pour le potentiel théorique maximal d'EDC. Le gisement de chaleur fatale est utilisé par l'altération accélérée à la chaux et la S-DACCS dit DACCS basse température.

La Figure 24 illustre l'allocation d'électricité et de chaleur fatale, avec en priorité l'altération accélérée d'olivine, peu consommatrice d'électricité, et moins chère (~125\$/CO₂) que la DACCS électrochimique (~200\$/tCO₂), puis l'altération accélérée à la chaux également moins chère que la DACCS, puis la S-DACCS qui consomme le gisement de chaleur restant, et enfin la DACCS électro-chimique.

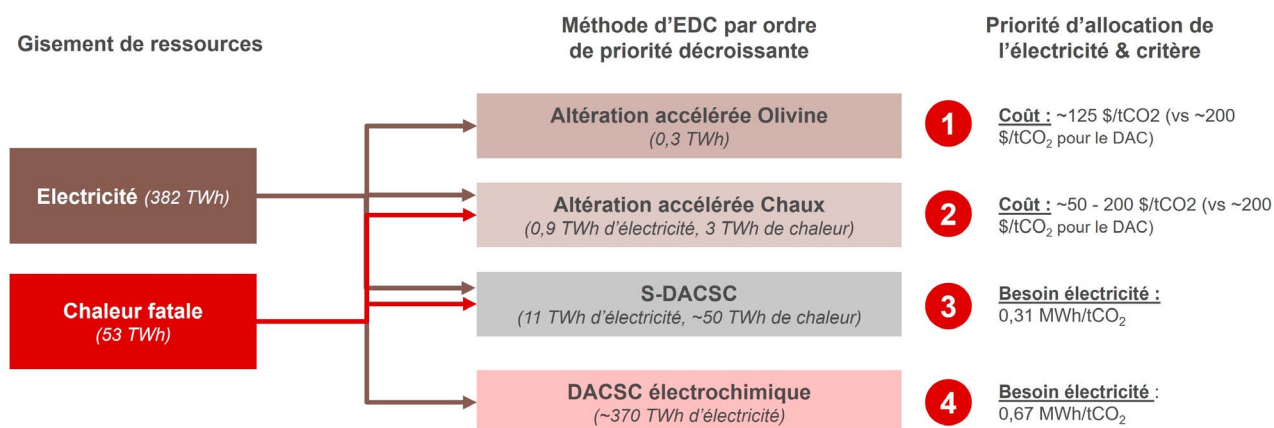


Figure 24 – Allocation du gisement d'électricité et de chaleur parmi les différentes technologies électro-intensives

La ressource dimensionnante pour les méthodes d'altération accélérée sera la disponibilité de roches, tandis que pour la DACCS électrochimique ce sera l'électricité.

La biomasse est un cas particulier, car c'est une ressource très utilisée pour des usages différents, notamment parce qu'elle contribue à la décarbonation de secteurs qui peuvent la substituer à des combustibles fossiles. Il semble donc difficile de déplacer ces usages. De plus, les perspectives pour ce gisement sont très incertaines, avec peu de chances de pouvoir l'augmenter significativement.

Catégorie	Type de biomasse	Source	Contraintes	Usages prioritaires	Unité	Vol. total	Gisement	Répartition	Usages	EDC
Biomasse issue de l'agriculture non alimentaire	Cultures dédiées à des usages non alimentaires	ONRB	Contraintes de récolte : volumes non accessibles comme du lisier produits aux champs, cas des pertes lors de récoltes	Alimentation humaine et animale, fertilisation, paillage	MtMS/an	0,1	0,1	73% 27%	Combustion Matériaux	BECSC Produits
	Cultures intermédiaires	FS			MtMS/an	23,8	4,4	100%	Méthanisation	BECSC
	Déchets agricoles	ONRB / FS			MtMS/an	139	17,8	41% 59%	Combustion Méthanisation	BECSC
	Effluents d'élevage	ONRB			MtMS/an	30,5	24,7	100%	Méthanisation	BECSC
	Plantes à fibre	ONRB			MtMS/an	0,8	0,7	12% 88%	Combustion Matériaux	BECSC Produits
	Plantes à parfum	ONRB			MtMS/an	0,08	0,025	56% 44%	Combustion Méthanisation	BECSC
Déchets urbains	Déchets verts urbains	ONRB / Modecom	Déchets recyclés pas utilisés pour EDC	Aucun	MtMB/an	61	5,14	0,4% 99,6%	Combustion Méthanisation	BECSC
	Huiles alimentaires usagées	France AgriMer	Aucun	Production de biocarburants	MtMB/an	0,08	0		Biocarburant ³	
	Déchets papiers/cartons	Modecom	Déchets recyclés pas utilisés pour EDC	Aucun	MtMB/an	6,8	0,14	100%	Combustion	BECSC
	Déchets issus du bois	Modecom	Aucun	Aucun	MtMB/an	2,3	2,3	21% 11% 68%	Combustion Biochar Recyclage	BECSC Biochar Produits
	Boues d'épuration	SDES	Aucun	Epandage, compost	MtMS/an	0,8	0,2	100%	Méthanisation	BECSC
	Déchets ménagers	Modecom	Aucun	Aucun	MtMS/an	4,9	4,9	100%	Méthanisation	BECSC
Coproduits de l'industrie	Trituration oléagineux	ONRB	Pertes lors du traitement maïs	Compostage, distillerie, alimentation humaine,	MtMB/an	3,70	0		Biocarburant ³	
	Betterave sucrière				MtMB/an	4,91	0,15	100%	Méthanisation	BECSC
agro-alimentaire	Fruits-légumes transfo.		données indisponibles	aliments pour animaux, etc.	MtMB/an	0,08	0			
	Vinification				MtMB/an	2,30	0,06	100%	Méthanisation	BECSC
	Industries des viandes				MtMB/an	1,17	0,36	52% 48%	Biocarburants ¹ Incinération	BECSC
	Ovoproduits				MtMB/an	0,05	0			
	Pêche et aquaculture				MtMB/an	0,20	0		Biocarburant	
	Distillation vinicole				MtMB/an	0,47	0,18	89% 11%	Combustion Méthanisation	BECSC
	Cidrierie				MtMB/an	0,007	0,006	50% 50%	Méthanisation Combustion	BECSC
	Pomme de terre				MtMB/an	0,24	0			
Biomasse forestière	Haies et agroforesterie	FS	Rentabilité d'exploitation	Aucun	Mm³/an	3,6	3,4	90% 10%	Combustion Biochar	BECSC Biochar
	Prélèvements forêts	Agreste /IGN	Papiers/cartons non utilisés pour EDC	Bois autoconsommé non disponible pour EDC	Mm³/an	88	33	63% 5% 32%	Combustion Biochar Produits	BECSC Biochar Produits

Tableau 7 : Allocation des gisements des sous-catégories de biomasse
Rouge – Type de biomasse non exploitable pour l'EDC, Vert – Type de biomasse exploitable pour l'EDC

L'allocation proposée de la biomasse se base largement sur des exercices similaires publiés (SNMB) (60), qui s'inscrivent dans la continuité des usages actuels des filières existantes (Tableau 7). Avec cette approche, peu de ressources en biomasse sont disponibles pour des filières innovantes comme la production de biochar. Cependant, en fonction des règles de comptabilité carbone sur la biomasse, cette situation pourrait évoluer. Ainsi le potentiel d'EDC pour le biochar peut être perçu comme conservateur et dépend grandement de l'allocation des ressources proposées dans le Tableau 7. Par soucis de simplification, s'il est possible de la valoriser simultanément une même biomasse selon plusieurs usages (ex : production de biochar couplée avec la production de biocarburant), seul l'usage prioritaire est retenu. En revanche pour une catégorie donnée de biomasse, plusieurs usages prioritaires peuvent être considérés, exemple : ~75% des cultures dédiées à des usages non alimentaires (Miscanthus, Taillis à courte rotation, etc.) sont fléchées vers la combustion i.e. BECSC et ~25% vers une valorisation sous forme de matériaux.

Pour les usages énergétiques (combustion et méthanisation), les gisements dans les différentes catégories de biomasse ont été convertis en énergie. Les valeurs des facteurs de conversion sont détaillées dans le Tableau 16 (annexe 10.4) et permettent de remonter à la quantité totale théorique d'énergie qui pourrait être produite à partir des différentes sources de biomasse. En effet, c'est la quantité d'énergie qui permet d'estimer le potentiel théorique d'EDC à partir d'autres facteurs de conversion compilés dans la base de données sur les besoins en ressources et qui permettent de convertir l'énergie en quantité de CO_{2eq} qui peut être retirée de l'atmosphère.

Afin de remonter au potentiel maximal d'EDC, pour chaque usage énergétique de la biomasse (méthanisation et combustion) les facteurs de conversion suivants entre l'énergie produite et la quantité de CO₂ émise ont été utilisés :

- Combustion: 2,7 MWh / t CO₂
- Méthanisation : 3,8 MWh / t CO₂

Enfin, une fois les gisements allouables déterminés, ceux-ci doivent être multipliés par un facteur de conversion permettant de calculer le volume de CO₂ qui peut être éliminé de l'atmosphère. Ces facteurs de conversion, par exemple en tCO₂/tonne de biomasse, ou en tCO₂/MWh de chaleur ou d'électricité, sont ceux déterminés en partie 3 du rapport. Le tableau ci-dessous décrit pour chaque méthode d'EDC étudiée, la ressource limitante dimensionnante, le gisement associé, le facteur de conversion de gisement vers un potentiel d'EDC, ainsi que le résultat du potentiel d'EDC en MtCO₂.

Macro-catégories	Catégories	Gisement limitant dimensionnant le potentiel d'EDC	Gisement théorique max	Facteur de conversion	EDC (MtCO _{2e} /an)	Source facteur de conversion
Conversion de La biomasse	BECSC	Biomasse pour biocarburants	10 TWh	3,6 MWh/tCO ₂	3	Service douanes
		Biomasse pour combustion	93 TWh	2,7 MWh/tCO ₂	35	ADEME
	Biochar	Biomasse pour méthanisation	122 TWh	3,8 MWh/tCO ₂	32	Base Empreinte
		Biomasse attribuée à la pyrogazéification	1,7 Mt	1,6 t/tCO ₂	0,52	BDD-BR
		Biomasse forestière attribuée aux produits biosourcés	8 Mt	0,7 t/tCO ₂	19	ADEME
Gestion des écosystèmes	Afforestation/reforestation	Evolution surfaces	2,9 Mha	0,27 ha/tCO ₂ /an	16	BDD-BR
	Tourbières	Evolution surfaces	6,5 kha	0,5 ha/tCO ₂ /an	0,003	EFESE
	Mangroves	Evolution surfaces	0 kha	0,56 tCO ₂ /ha/an	0	EFESE
	Herbiers marins	Evolution surfaces	8 kha	0,27 tCO ₂ /ha/an	0,03	EFESE
	Pratiques stockantes	Superficies (2050)			61	INRAE
	dont pratiques stockantes agricoles					
	Insérer et allonger Les cultures intermédiaires	Superficies (2050)	13,5 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	9,9	INRAE
	Développer le semis direct	Superficies (2050)	9,5 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	1,9	INRAE
	Planter des haies en périphérie des parcelles cultivées	Superficies (2050)	7,4 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	9,2	INRAE
	Insérer/allonger les prairies dans les rotations des cultures	Superficies (2050)	5,6 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	5,1	INRAE
	Développer l'agroforesterie	Superficies (2050)	4,5 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	23,7	INRAE
	Mobiliser de nouvelles ressources organiques	Superficies (2050)	1,2 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	0,4	INRAE
	dont pratiques stockantes des prairies					
	Augmenter modérément la fertilisation azotée des prairies	Superficies (2050)	3,9 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	0	INRAE
	Remplacer la fauche par le pâturage	Superficies (2050)	0,10 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	0,10	INRAE
	dont pratiques stockantes viticoles					
	Enherbement hivernal	Superficies (2050)	0,4 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	0,4	INRAE
	Enherbement permanent	Superficies (2050)	0,2 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	0,2	INRAE
	dont pratiques stockantes forestières	Superficies (2050)	19,8 Mha	0,736 tCO ₂ /ha/an	9,88	INRAE
Géochimie	Altération accélérée calcaire	Roches/minéraux	5,2 Mt/an	1,65 t/tCO ₂	3,1	BDD-BR
	Altération accélérée olivine	Roches/minéraux	3 Mt/an	1,03 t/tCO ₂	3,0	BDD-BR
	Altération accélérée basalte	Roches/minéraux	3 Mt/an	3,3 t/tCO ₂	0,9	BDD-BR
	Altération accélérée dolomie	Roches/minéraux	0,2 Mt/an	3,3 t/tCO ₂	0,1	Identique basalte
	Altération accélérée CKD	Roches/minéraux	0,3 Mt/an	3,3 t/tCO ₂	0,1	Identique basalte
Electrochimie	DAC électro-chimique	Electricité	372 TWh	0,68 MWh/tCO ₂	549	BDD-BR
	S-DAC	Chaleur fatale basse température	48 TWh	1,66 MWh/tCO ₂	29	BDD-BR
	L-DAC	Chaleur fatale haute température	0 TWh	1,9 MWh/tCO ₂	0	BDD-BR
	DOCCS	Électricité	0 TWh	n/a	n/a	

Tableau 8 Gisements et potentiel d'élimination théoriques maximaux des méthodes d'EDC

6.2. Potentiels théoriques maximaux d'EDC

En sommant les potentiels offerts par chaque méthode on obtient un **potentiel théorique maximal** d'EDC pour la France qui s'élève à ~780 MtCO₂ éliminées par an à l'horizon 2050 (cf. Figure 25). Celui-ci est dominé par les technologies électro-chimiques comme la DACCS, qui représentent ~550 MtCO₂/an d'EDC. Les pratiques stockantes disposent du 2nd gisement avec près de 90 Mt CO₂/an. La BECSC arrive en troisième position, avec ~70 MtCO₂/an d'EDC.

Il est important de rappeler que ce potentiel annuel est **purement théorique**. Il est atteint si toute la biomasse française disponible après attribution aux usages prioritaires, est allouée aux méthodes d'EDC comme la BECSC par exemple, et que la France développe au maximum sa capacité de production d'énergie renouvelable (selon les études de RTE), pour allouer l'intégralité du surplus d'électricité (382 TWh) aux méthodes d'EDC comme la DACCS. La Figure 25 illustre les potentiels d'EDC annuels par méthode et indique les facteurs limitants dans chaque cas.

Certaines méthodes trop coûteuses, avec un rendement énergétique trop faible, n'ont pas été retenues pour le calcul du potentiel théorique maximal d'EDC. C'est le cas du DOCSC, de l'OAE électrochimique et des pratiques stockantes des mangroves, et de l'enfouissement des algues. Il est donc important de noter que ce potentiel théorique comporte un marge d'erreur négative, avec potentiellement des impossibilités techniques qui sont difficiles à quantifier, mais également une marge d'erreur positive, avec des méthodes exclues de l'estimation et qui pourraient faire leurs preuves dans les prochaines années.

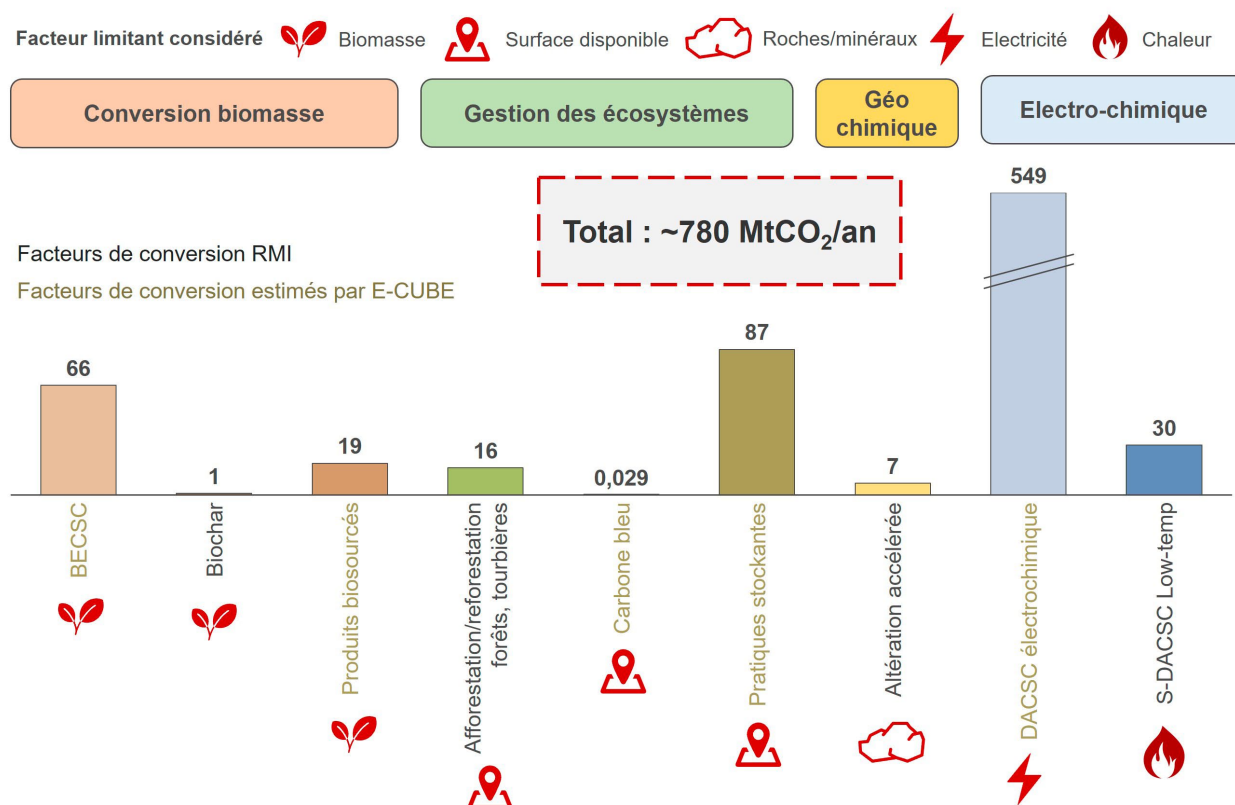


Figure 25 – Potentiel d'EDC des différentes méthodes et technologies, avec allocation du gisement de ressources nécessaires [MtCO₂/an]

Dans la partie 8 du rapport, le potentiel d'EDC plausible sera estimé à partir de ce potentiel théorique maximal. Il prendra en compte des contraintes supplémentaires, comme l'environnement réglementaire et économique, et l'adhésion publique, qui viendront réduire les volumes présentés ci-dessous.

7. Panorama socio-économique en France

Au-delà du gisement « physique » des solutions d'EDC, des contraintes économiques et sociales sont également à prendre en compte pour estimer un potentiel réaliste de déploiement de ces solutions.

Pour étudier ces contraintes, cette partie analyse les performances économiques de la France et sa capacité à financer le déploiement des solutions d'EDC. Ensuite, les opinions des principales catégories d'acteurs de la société française (Etat, citoyens, entreprises, associations) sur les méthodes d'EDC sont étudiées. Enfin, les imaginaires conditionnant la vision des citoyens sur les méthodes d'EDC sont mis en lumière à partir des travaux de l'ADEME pour explorer l'adhésion public a des entreprises telles que le déploiement de l'EDC.

7.1. Economie française

La France est le 7^{ème} pays le plus riche du monde en termes de PIB et le 28^{ème} pays le plus riche en termes de PIB par habitant. Son PIB était de 2 501 milliards d'euros en 2021 (INSEE). La population française était de 67,8 millions d'habitants en 2022 (INSEE). Le taux de chômage est de 7,2% de la population active (hors Mayotte) (INSEE). La main d'œuvre française est bien formée et dispose des compétences qui seraient nécessaires au déploiement des solutions d'EDC. Le taux de croissance du PIB est d'environ 1 à 2 % par an, avec une diminution forte pendant la période Covid. Ce taux tend à diminuer depuis 1950 (INSEE).

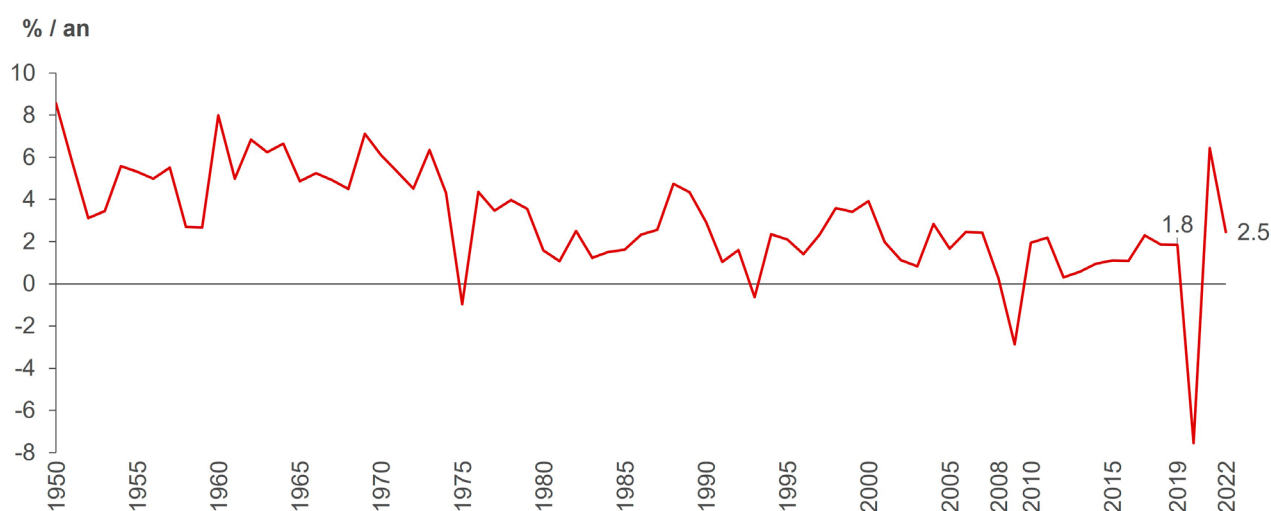


Figure 26 - Evolution annuelle du PIB en France de 1950 à 2022, en % par an (INSEE)

La création de valeur ajoutée en France est majoritairement issue des services (79%), suivis de l'industrie (13%), de la construction (6%) et de l'agriculture (2%) (INSEE).

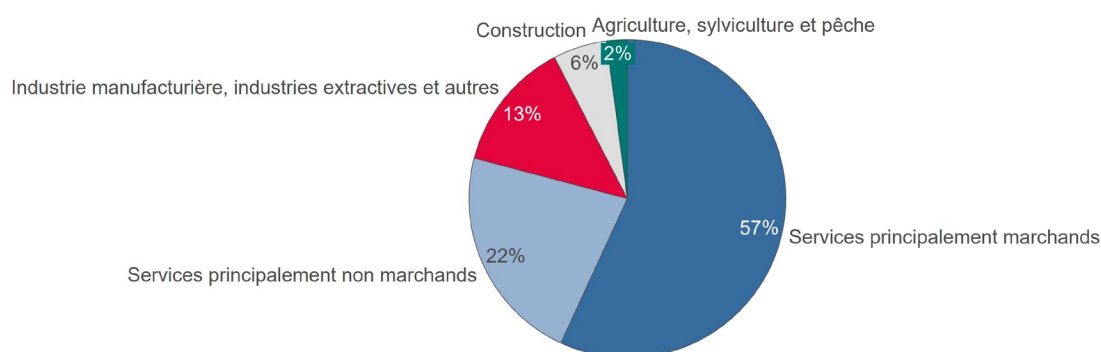


Figure 27 - Répartition de la valeur ajoutée en France par branche, en 2022 (INSEE)

7.1.1. Exploration du coût de déploiement des méthodes d'EDC selon les différents scénarios de l'ADEME

Le déploiement des technologies d'EDC va requérir des investissements conséquents. Dans le rapport « *Climate Change 2022, Mitigation of climate change* » du GIEC (2), le GIEC estime le coût d'abattement à maturité des principales méthodes d'EDC entre 0 à 400 USD/tCO₂, avec notamment un coût compris entre 100 et 300 USD/tCO₂ pour la DACCS électrochimique, et entre 15 et 400 USD/tCO₂ pour la BECCS.

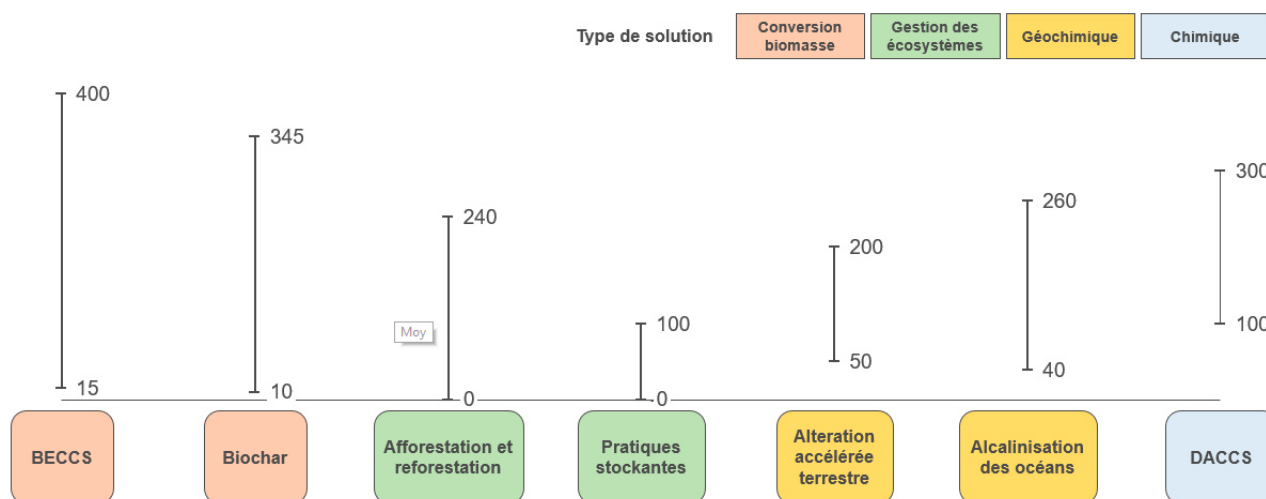


Figure 28 – Coût d'abattement des principales solutions d'EDC selon le GIEC, en USD / tCO₂

Le rapport de l'ADEME Transitions 2050 (20) présente plusieurs estimations des puits de carbone naturels et technologiques en 2030 et 2050. Ces puits représenteraient une élimination de CO₂ de 40 à 80 MtCO_{2eq}/an en 2030 et 93 à 133 MtCO_{2eq}/an en 2050, en prenant en compte puits naturels et puits technologiques (BECCS, DACCS).

Pour estimer le coût de mise en place ces puits de carbone, seuls les capacités additionnelles pour puits naturels et technologiques sont prises en compte. La CSC est exclue car il ne s'agit pas d'émissions négatives. De plus, les puits naturels représentaient déjà 44 MtCO_{2eq}/an en 2017 selon l'ADEME. Dans l'analyse suivante, ces émissions sont retranchées du puits de carbone total en 2030 et 2050 afin de ne prendre en compte que l'augmentation des puits de carbone entre aujourd'hui et 2030, et aujourd'hui et 2050.

Les puits de carbone **additionnels** seraient donc de 6 à 35 MtCO_{2eq}/an en 2030 et de 34 à 72 MtCO_{2eq}/an en 2050 selon les scénarios de l'ADEME.

Pour estimer le coût de déploiement de ces puits de carbone additionnels, les valeurs de 100 €/tCO₂ pour les puits naturels et 200 €/tCO₂ pour les puits technologiques sont utilisées, correspondants aux moyennes des coûts d'abattement de la reforestation/afforestation et des puits technologiques (BECCS, DACCS) vus par le GIEC. Le coût de déploiement de l'EDC est ainsi estimé entre 1,2 et 3,5 milliards d'euros par an en 2030, 3,9 à 11,2 milliards d'euros par an en 2050 pour les scénarios de l'ADEME (tendanciels, S1 à S4).

Le PIB français était de 2 501 milliards d'euros en 2021. Le coût de déploiement de l'EDC représenterait ainsi de 0,05% à 0,14% du PIB en 2030 et de 0,16% à 0,45% du PIB en 2050 pour les scénarios de l'ADEME.

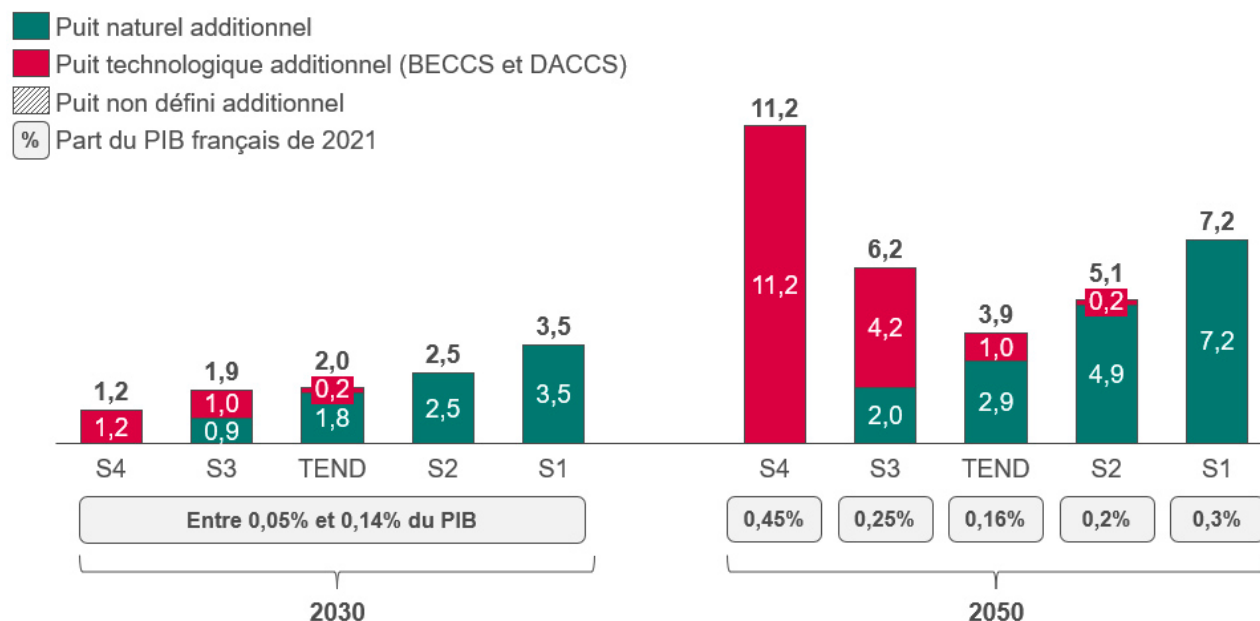


Figure 29 – Coût estimé du déploiement des puits naturels et technologiques additionnels entre 2017 et 2030, et entre 2017 et 2050, selon les scénarios de l'ADEME, en Md€/an (% part du PIB Français de 2021)

Ces montants sont importants et à comparer avec les capacités de financement de la France dans le contexte d'une transition écologique de toute son économie.

7.1.2. Estimation de la capacité de la France à financer

Vision 2030

Le déploiement des méthodes d'EDC représenterait au plus haut en 2030, selon les scénarios de l'ADEME, un coût d'environ 3.5Md€ soit 0,14% du PIB (de 2021). C'est un besoin de financement important. A titre de comparaison, la transition écologique dans son ensemble (*a priori* hors EDC) nécessiterait un investissement **supplémentaire net** (par rapport à un scénario sans transition) de 69 milliards d'euros par an en 2030, soit 2,8% du PIB, selon le rapport « *Les incidences économiques de l'action pour le climat* » de France Stratégie, Jean Pisani-Ferry et Selma Mahfouz (61). Ces 69 milliards correspondent d'ici à 2030 à un investissement supplémentaire de 101 milliards d'euros « verts » par an, une réduction de 35 milliards d'euros des investissements « bruns » annuels, et trois milliards pour l'adaptation au changement climatique.

Selon le « *Rapport sur l'impact environnemental du budget de l'Etat* » (octobre 2022) du gouvernement et le rapport « *Appréier la contribution de la dépense publique à la transition écologique* » de la Cour des comptes, le PLF 2023 (projet de loi de financement 2023) contient environ 34 milliards d'euros de dépenses budgétaires favorables à l'environnement, 20 milliards d'euros de dépenses budgétaires défavorables à l'environnement, 2 milliards d'euros de dépenses mixtes (impacts à la fois favorables et défavorables) et 90% de dépenses « neutres » (soit 510 milliards d'euros). (62), (63).

L'investissement **supplémentaire** requis pour les technologies d'EDC représenteraient ainsi un supplément de 1,7% à 5,1% par rapport aux 69 milliards d'investissements annuels **supplémentaires** requis selon Pisani-Ferry. Si ces 69 milliards annuels se poursuivaient en 2050, l'investissement dans l'EDC représenterait un supplément de budget de 6% à 16%.

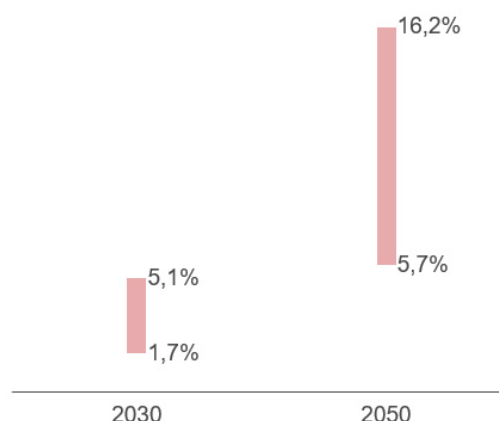


Figure 30 – Supplément d'investissement pour le déploiement de l'EDC en 2030 et en 2050 par rapport aux 69 milliards d'euros d'investissement annuels pour la transition écologique estimés par le rapport Pisani Ferry

Ces 69 milliards d'investissements annuels concernent essentiellement le secteur du bâtiment (rénovation thermique des logements), le secteur énergétique (énergies renouvelables, nucléaire), l'industrie (électrification des procédés, procédés moins émetteurs, efficacité énergétique), l'adaptation au changement climatique, le transport (développement de la mobilité électrique, du train, du vélo, etc...) et l'agriculture.

Ces investissements seraient financés en part presque égale entre le public (Etat et collectivités) et le privé (entreprises et ménages).

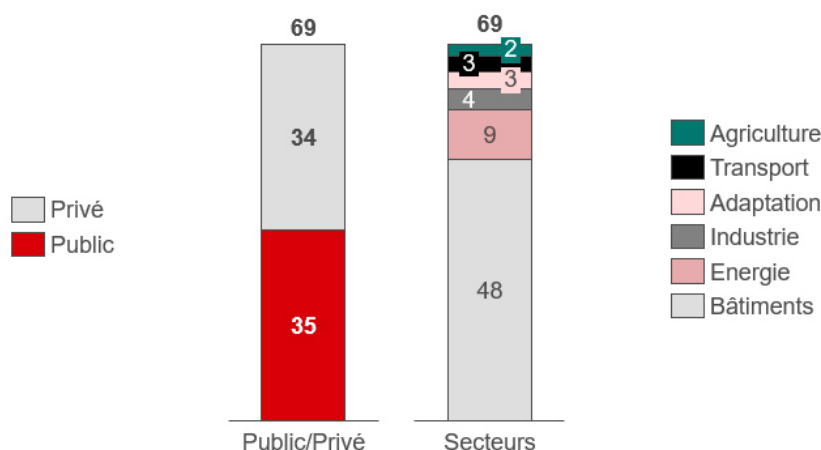


Figure 31 – Répartition des investissements supplémentaires nécessaires en 2030 pour atteindre la neutralité carbone en 2050 selon France Stratégie, en milliards d'euros par an (61)

Les investissements publics sont conséquents et entraîneront des répercussions économiques importantes. Selon Pisani Ferry, le risque d'augmentation de la dette publique (écart par rapport au scénario de référence) serait de l'ordre de 10% du PIB en 2030, 15% en 2035 et 25% en 2040. Le supplément en investissements annuels requis pour le déploiement de l'EDC (1,7 à 5,1% en 2030) augmentera cet effort public et ses conséquences économiques.

Sources de financement :

Quatre sources de financement public pourraient être trouvées selon le rapport Pisani Ferry et l'Institut Rousseau.

La première source de financement est le **redéploiement des dépenses budgétaires et fiscales**. Selon Pisani Ferry, « *le total des dépenses et dépenses fiscales brunes des administrations publiques seraient de l'ordre de 25 milliards d'euros par an. Le potentiel de redéploiement est donc plus que significatif* ».

La seconde source est **l'endettement**. Pisani Ferry rappelle à ce titre que l'endettement est en principe souhaitable si le taux d'intérêt est inférieur au taux de croissance nominal.

La troisième source est une **augmentation des prélèvements obligatoires sur le capital**. Pisani Ferry précise en ce sens que « *l'analyse économique montre d'ailleurs que la réponse optimale à des chocs exogènes prolongés sur la dépense publique est de les financer par des prélèvements exceptionnels et explicitement temporaires sur le capital* ».

Enfin, la quatrième source de financement est le **changement de politique monétaire**. Cette source est évoquée par l'Institut Rousseau dans son rapport « *2% pour 2 degrés, les investissements publics et privés nécessaires pour atteindre la neutralité carbone de la France en 2050* » (64). Il propose à ce titre de :

1. Introduire par la BCE, de manière raisonnée et fléchée vers la transition écologique, de la monnaie libre (libre de dettes) dans des volumes limités et décidés sous contrôle démocratique
2. Annuler les dettes publiques détenues par le système européen de banques centrales (SEBC), soit près de 750 milliards d'euros pour la France, en échange de l'engagement de l'Etat français à investir dans la transition écologique

Dans le premier cas, la BCE pourrait par exemple acheter des obligations émises par la banque d'investissement publique (BPI) française et l'Etat français, à taux nul, et les garder indéfiniment dans son bilan. Les montants d'introduction de monnaie libre seraient délimités par le Parlement français. Ces montants seraient utilisés pour investir dans la transition écologique.

Dans le second cas, l'annulation de la dette publique détenue par les banques centrales européennes permettrait d'offrir des liquidités supplémentaires à l'Etat français (car la charge de la dette diminuerait). Selon le rapport, « *la perte pour les banques centrales nationales (BCN) liée à l'abandon des créances publiques qu'elles détiennent pourrait être compensée par le pouvoir de création monétaire de la BCE : cela est prévu à l'article 32.4 du protocole n°4 sur le fonctionnement du SEBC. Par conséquent, il n'existerait aucun risque de fonds propres négatifs pour les BCN* ».

Sources de financement spécifiques à l'EDC :

Pour les porteurs de projet d'EDC, les sources de financement seraient essentiellement les crédits carbone, les financements publics et les investissements des entreprises voulant se décarboner en interne (industriels déployant de la BECSC par exemple). Par ailleurs, l'Etat et les collectivités locales, les entreprises et les ménages auraient plusieurs façons d'investir dans l'EDC Figure 32.

Acteur	Moyens d'investir dans l'EDC
Etat et collectivités locales	<ul style="list-style-type: none"> • Commande publique d'EDC • Soutien à l'innovation dans l'EDC via la BPI ou les fonds ADEME • Dépense fiscale (via crédits d'impôt par ex) pour encourager les entreprises à mener des projets d'EDC • Création de mécanismes réglementaire incitant la commande d'EDC dans les chaînes de valeur
Entreprises	<ul style="list-style-type: none"> • Achat de crédits carbone issue d'acteurs de l'EDC • Financement de projets d'EDC directement par les industriels (BECSC, biochars) • Participation au financement public de l'EDC par la fiscalité et les taxes • Achats d'intrants issue de filières mettant en œuvre de l'EDC • Placement de l'argent dans des plans d'épargne verts
Ménages	<ul style="list-style-type: none"> • Participation au financement public de l'EDC par la fiscalité et les taxes • Placement de l'argent dans des plans d'épargne verts • Achat volontaire de crédits de carbone, de parts de forêts par ex • 'Crowdfunding de projets d'EDC

Figure 32 – Moyens d'investir dans les solutions d'EDC (non exhaustif) par l'Etat et les collectivités locales, les entreprises et les ménages (auteur)

Ces investissements pourraient être stimulés par plusieurs instruments dont les instruments fondés sur le marché, comme les marchés de quotas carbone échangeables et la taxe carbone, et les instruments non fondé sur le marché comme la réglementation (cibles d'émission, normes) et l'intervention publique (investissements publics, commande publique).

La taxe carbone et l'obligation réglementaire donnée aux entreprises de se décarboner devraient notamment stimuler l'achat de crédits carbone émis par les porteurs de projets EDC pour réduire leurs émissions comptables. Cette dynamique assurerait davantage de financement vers l'EDC.

Vision long terme (2050) :

Même si à court terme (2030), les investissements dans la transition écologiques risquent d'augmenter la dette publique, la mise en œuvre de la transition écologique devrait se traduire au long terme par des effets économiques positifs qui pourraient bénéficier à la mise en œuvre des solutions d'EDC.

Selon le feuillet « Les effets macroéconomiques » du rapport de l'ADEME Transitions 2050 (65), la transition écologique devrait impliquer en 2050 :

- Un taux de croissance annuel du PIB supérieur dans les quatre scénarios à celui du tendanciel, à l'exception du scénario S1 qui prévoit une baisse drastique de la production industrielle et du bâtiment en niveau
- Une augmentation de l'investissement par rapport au tendanciel
- Une augmentation du nombre d'emplois par rapport au tendanciel
- Une contraction des échanges extérieurs (sauf pour S4) avec une amélioration du solde de la balance commerciale.

7.2. Paysage politique et opinion publique

Quatre types d'acteurs peuvent être distingués dans le paysage politique français : 1) les citoyens et l'opinion publique, 2) l'Etat, 3) les entreprises privées et 4) les représentants de la société civile (associations, syndicats, ONG). Chaque acteur a une vision différente des solutions d'EDC.

Les positions générales de ces types d'acteurs sont résumées dans le Tableau 9.

Type d'acteur	Position générale
Etat	Les services de l'Etat sont généralement intéressés par les solutions BECSC, DACCS, l'afforestation/reforestation, la protection des écosystèmes côtiers et marins, et la restauration des zones humides. Ils sont moins à l'aise en revanche avec les solutions géochimiques et le biochar qui ne sont pas mentionnées dans les textes officiels. Au global, les services de l'Etat misent encore principalement sur les solutions basées sur la nature, mieux acceptées par le grand public.
Opinion publique	Le niveau de sensibilité environnementale des Français stagne entre 2005 et 2022 mais la place du changement climatique au sein des préoccupations environnementales a fortement augmenté entre 2010 et 2022. Même si les Français souhaitent que l'Etat agisse en faveur du climat, les recours sont nombreux contre les projets d'énergies renouvelables ainsi que les projets de mines de lithium. De plus, nombreux sont les discours qui dénoncent l'inaction climatique. Des recours pourraient ainsi empêcher le déploiement des EnR pour alimenter en électricité la DACCS ou l'ouverture de mines d'olivine ou de calcaire pour les méthodes géochimiques.
Entreprises privées	Un écosystème autour des méthodes d'EDC se développent et les industriels semblent vouloir développer les solutions CSC pour se décarboner. Cependant, les entreprises qui développent ou achètent de l'EDC sont encore une minorité, notamment à cause du manque de visibilité sur ces activités.
Associations	Le Réseau Action Climat se montre prudent, voire sceptique, sur le CSC, tout comme Greenpeace qui qualifie les solutions de stockage de carbone et de géo-ingénierie de « fausses solutions ». La Confédération paysanne appelle quant à elle à un moratoire sur la méthanisation. Néanmoins, plusieurs associations soutiennent l'EDC comme les partenaires de Carbon Gap.

Tableau 9 – Synthèse des points de vue généraux des quatre grandes catégories d'acteurs de la société française sur les solutions d'EDC

Opinion publique :

Le niveau de sensibilité de la population française aux enjeux environnementaux semble stagner entre 2005 et nos jours. Selon le SDES, « Sur une échelle de 1 à 7, la note moyenne de sensibilité environnementale était de 5,22 en 2005. Cette note atteint la valeur de 5,49 en 2011 avant de régresser dans les années suivantes. Après un léger rebond en 2019, cet indicateur atteint un niveau historiquement bas en 2021 (4,94), ce qui interpelle dans un contexte marqué par la pandémie de Covid-19 » (66).

*Chacun peut se sentir plus ou moins concerné par les problèmes d'environnement.
Vous-même, pouvez-vous vous classer sur une échelle de sensibilité à l'environnement,
de 1 si vous y êtes totalement insensible à 7 si vous y êtes très sensible.
Comment vous-classez-vous ?*

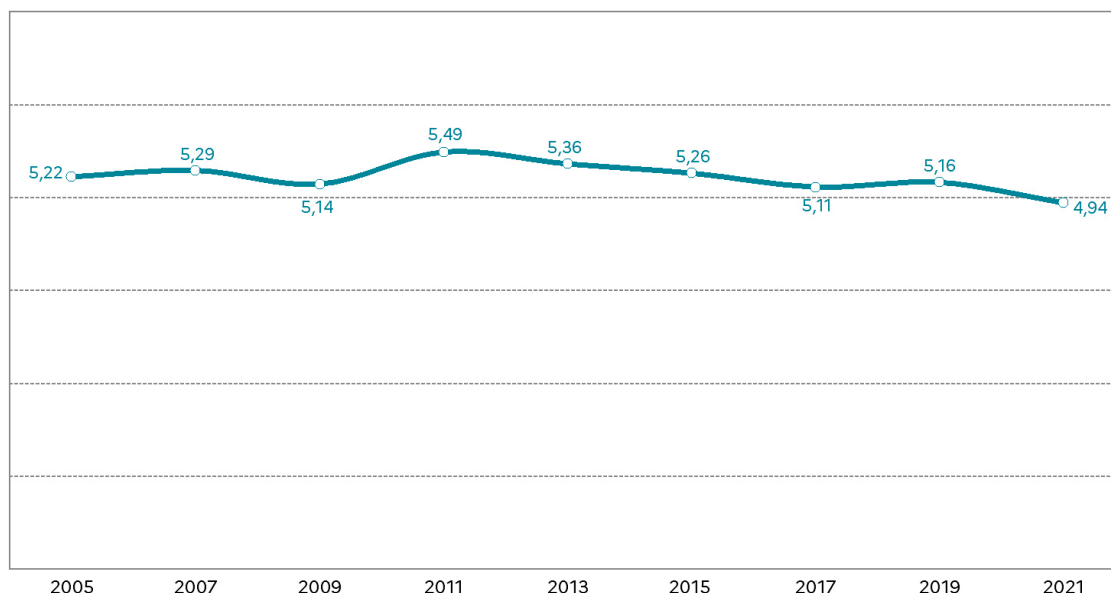


Figure 33 – Niveau de sensibilité de la population française aux problèmes environnementaux (66)

Le niveau de sensibilité semble par ailleurs plus élevé que les chez personnes âgées que chez les jeunes, puisque celui-ci est en moyenne de 5,25 pour les 60-69 ans contre 4,73 pour les moins de 25 ans.

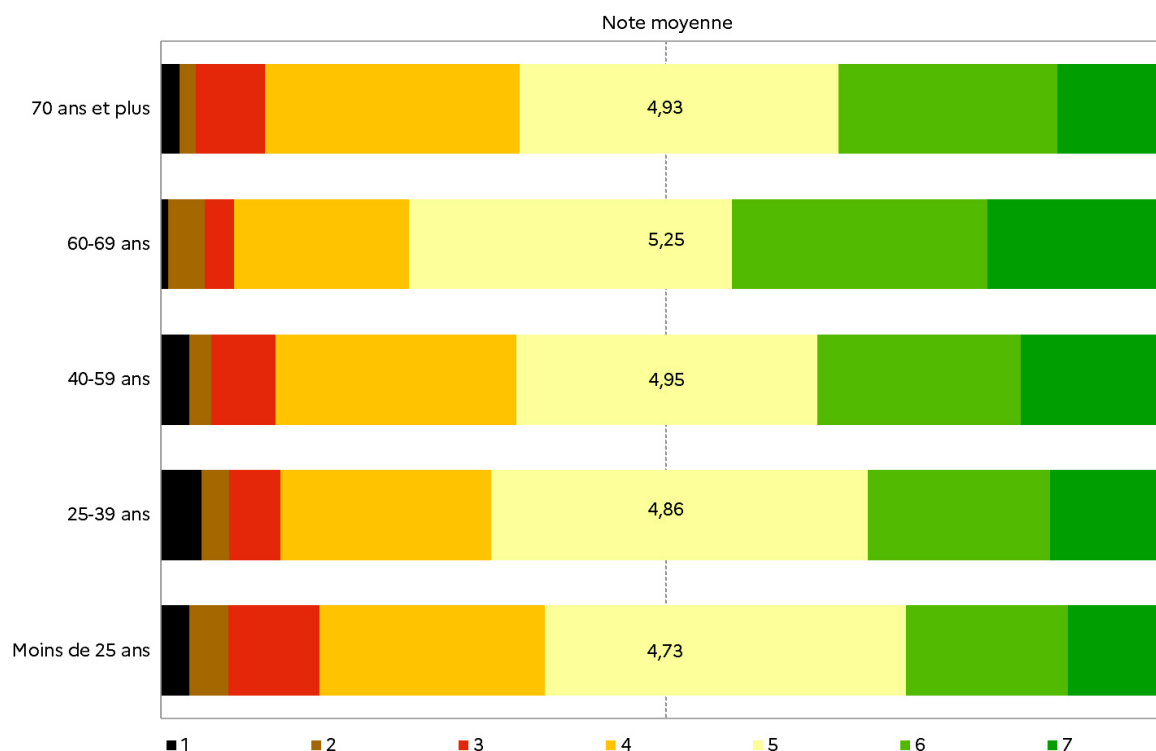


Figure 34 – Niveau de sensibilité environnementale de la population française en fonction de la classe d'âge (66)

Néanmoins, au sein des préoccupations environnementales, les Français semblent de plus en plus inquiets face au changement climatique. Le réchauffement climatique est jugé comme le problème le plus préoccupant par 44% des sondés en 2022 contre environ 16% en 2010 (Figure 35).

Parmi les problèmes suivants liés à la dégradation de l'environnement, quel est celui qui vous paraît le plus préoccupant ?

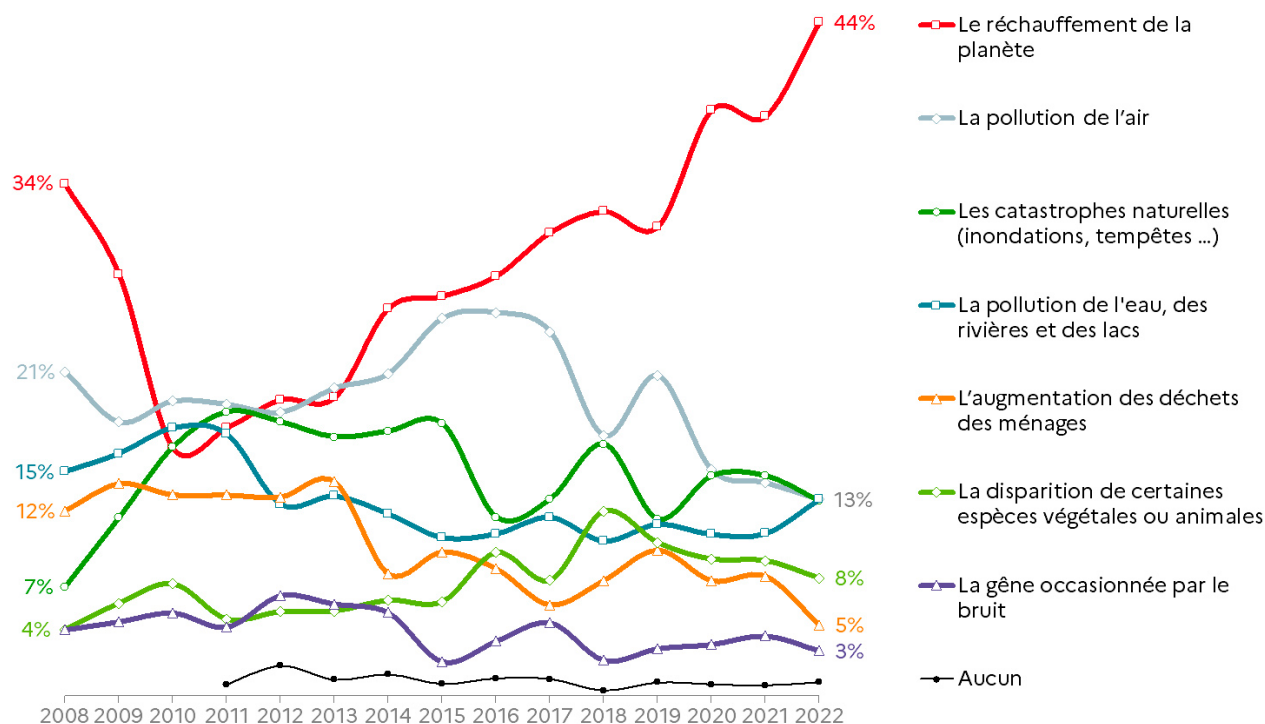


Figure 35 - Préoccupation des Français au sujet des enjeux environnementaux (66)

Les Français estiment à 53% que les pouvoirs publics sont les acteurs qui devraient agir en priorité pour la protection de l'environnement (SDS).

Par ailleurs, même si les Français placent de plus en plus le changement climatique en haut de leurs préoccupations environnementales et souhaitent que l'Etat s'engage en ce sens, ils ne sont pas tous prêts à accepter des contraintes comme la limitation de la vitesse sur les autoroutes ou le déploiement des énergies renouvelables éoliennes et photovoltaïques. Il y a par exemples souvent des recours contre l'installation de projets éoliens ou photovoltaïques. Or le déploiement de ces énergies renouvelables est nécessaire pour déployer avec une grande envergure les méthodes d'EDC comme la DACCS.

Autre exemple, il est probable que les citoyens portent également des recours contre l'ouverture de mines d'olivine ou de calcaire qui seraient utiles pour réaliser de l'altération accélérée terrestre. Par exemple, des citoyens se mobilisent déjà contre l'ouverture prochaine de mines en lithium dans l'Allier, en Bretagne et en Alsace.

Panel citoyen

Dans le cadre du projet, Carbon Gap s'est associé à **Missions publiques** pour réaliser un panel citoyen du grand public sur la perception de l'EDC. Celui-ci s'est tenu le 17 novembre 2023 à Rennes, et a rassemblé 24 participants couvrant une diversité d'âges, de genres, de formation, de profession et d'origines géographiques. Les principaux enseignements sont résumés ci-dessous :

- Les participants ont signalé la difficulté pour eux de comprendre en si peu de temps et en détails chacune des méthodes discutées, ainsi que leurs implications et les enjeux.
- Les participants ont souligné l'importance d'une répartition équitable des efforts, de la complémentarité avec la sobriété et l'efficacité énergétique, de la communication rigoureuse et transparente, et de la prise en compte des impacts sur les écosystèmes et la biodiversité ;
- Les participants ont montré une ouverture à certaines technologies tout en exprimant des préoccupations concernant les impacts incertains, la nécessité de clarté et de transparence, et l'importance d'une répartition équitable des coûts entre les pays ;
- Opinions assez variées, notamment concernant les technologies de capture du dioxyde de carbone allant du soutien à une vision technologique audacieuse à la confusion et au besoin de plus de clarté préalable sur le sujet ainsi que le besoin d'une répartition équitable des coûts entre les pays.

Enfin, même si le climat est devenu la première des préoccupations environnementales des Français, de nombreux **discours** existent pouvant retarder la mise en œuvre de solutions en faveur du climat, dont certaines solutions d'EDC. Ces discours ont été répertoriés par une étude de l'Université de Cambridge (67) et sont présentés dans l'illustration ci-dessous.

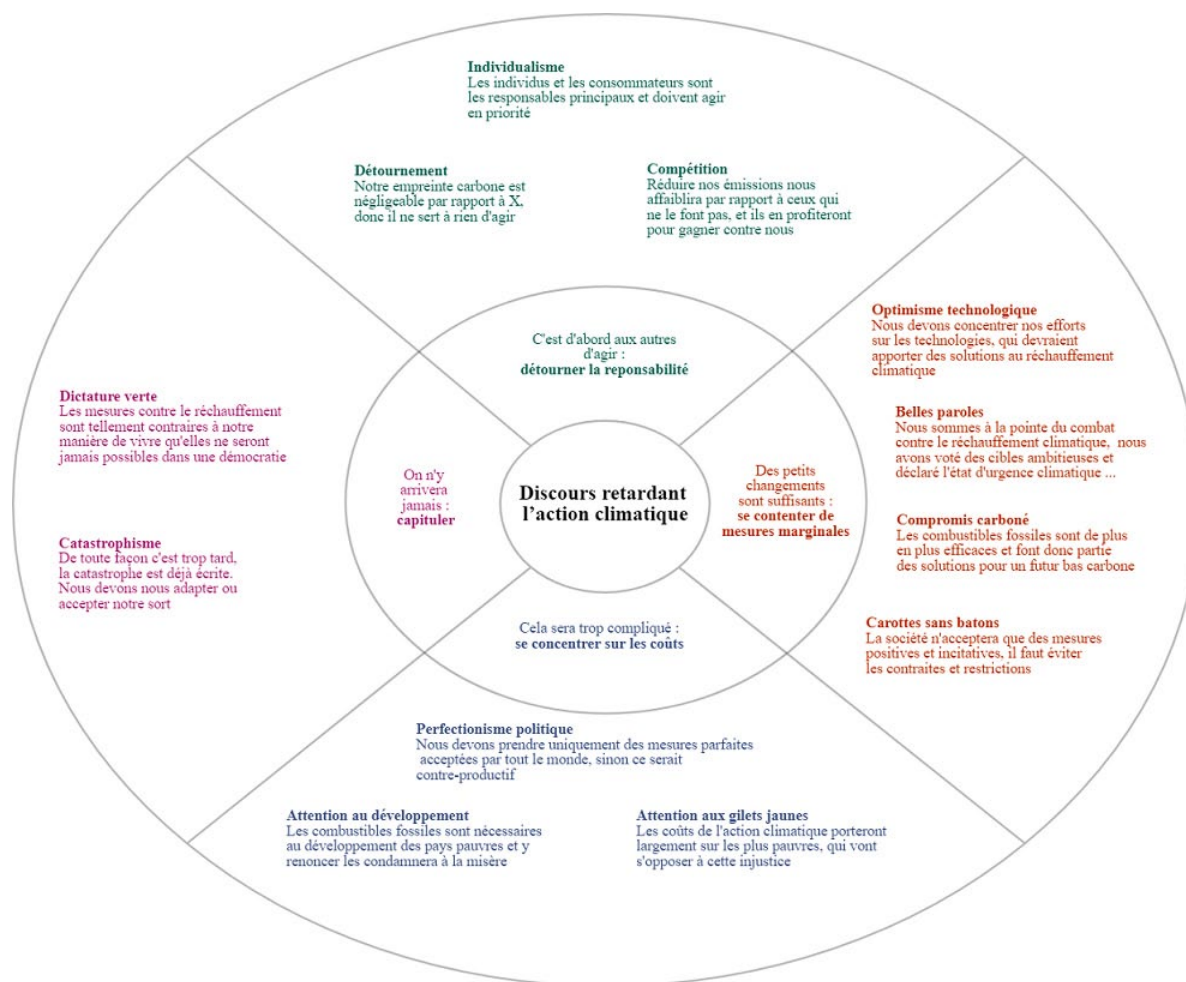


Figure 36 - Discours pouvant retarder l'action climatique (67)

Parmi ces discours, le discours de « *l'optimisme technologique* » se traduisant par « *nous devons concentrer nos efforts sur les technologies qui devraient apporter des solutions au réchauffement climatique* » pourrait être néanmoins favorable au déploiement des méthodes d'EDC représentant des puits de carbone technologiques comme la BECSC, la DACCS, les biochars et les solutions géochimiques.

Entretiens ciblés auprès des parties prenantes

Une quinzaine d'entretiens d'une heure et demie ont été réalisés avec les acteurs du secteur pour récolter leur perception concernant à la fois les objectifs climatiques visés par la France, les moyens mis en œuvre, leurs connaissances de l'EDC et la place de ces méthodes dans la réalisation de ces objectifs.

L'Etat

L'Etat ne s'est pas prononcé sur toutes les solutions d'EDC. Néanmoins, les solutions BECSC, DACCS, les solutions de changement d'occupation des sols et de pratiques stockantes ont déjà été évoquées.

A ce titre, le Secrétariat Général à la Planification Ecologique (SGPE) évoque les solutions BECSC, DACCS, l'afforestation/reforestation et la protection des écosystèmes comme les récifs coralliens et les écosystèmes côtiers dans son plan de planification écologique à horizon 2030.

Par exemples, le SGPE affirme dans sa stratégie CCUS que le gouvernement souhaite « *approfondir la stratégie BECSC et DACCS* » et « *définir les mécanismes de financement pour les sites industriels* » concernant le captage de CO₂ (68).

Concernant les écosystèmes, le SGPE souhaite augmenter la surface forestière métropolitaine de 0,9 Mha en 11 ans et estime que « *la protection des écosystèmes emblématiques, dont les récifs coralliens, ainsi que des écosystèmes côtiers, constituent un enjeu majeur* ». Il souhaite notamment à ce titre « *restaurer 50 000 hectares de zones humides d'ici 2026* » (58).

Le SGPE souhaite « *atteindre la zéro artificialisation nette en 2050, soit réduire de 50% le rythme d'artificialisation de nos sols sur la prochaine décennie* » et « *se doter d'un réseau d'aire protégées cohérent et ambitieux, en atteignant notamment 10% de protection forte dans les milieux sensibles et menacés* » (58).

De plus, le SGPE précise que « *la protection des sols [...] représente un levier essentiel pour stocker une partie des émissions de gaz à effet de serre* » et souhaite inciter à « *un moindre retournement des sols* » dans les prairies et entretenir les haies existantes dans les sols cultivés, ainsi que planter plus de 5 000 km linéaires par an de nouvelles haies. Il souhaite en outre « *multiplier par deux les surfaces de couverts intermédiaires* ». Le SGPE se montre ainsi en faveur des pratiques stockantes des sols cultivés et des prairies (58).

En revanche, l'Etat ne fait pas mention des méthodes d'EDC géochimiques (altération accélérée terrestre) et du biochar dans sa communication.

A ce sujet, il est utile de mentionner que la Charte de l'environnement de 2004 a constitutionnalisé le **principe de précaution**. Ce principe stipule selon l'article 5 de cette charte que « *lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage* » (69). Il est possible que ce principe empêche la mise en œuvre des méthodes d'EDC géochimiques (altération) et de cultures à grande échelle d'algues pour leur enfouissement tant que leur innocuité n'aura pas été démontrée (2).

Entreprises privées

Concernant les entreprises privées, un écosystème autour des solutions de l'EDC semble se créer et les industriels semblent vouloir développer les technologies de CSC pour se décarboner. Le déploiement de ces technologies de CSC pourrait ensuite se faire via du BECSC si le CO₂ capté est biogénique.

Si les ambitions climatiques et la stratégie "Fit for 55" sont jugées ambitieuses, elles n'en restent pas moins confrontées à un défi de taille. Un consensus émerge quant à l'insuffisance du cadre réglementaire et des incitations financières pour les atteindre. De plus, la méconnaissance des engagements climatiques au-delà du niveau national souligne la nécessité d'une vision plus globale et d'une coopération internationale renforcée. Des initiatives régionales telles que les SRADDET et les PCAET, ainsi que des coalitions européennes comme Real Zero Europe, témoignent des efforts concertés déployés pour relever ces défis.

Dans ce contexte, la France se trouve à la croisée des chemins quant à la mise en œuvre de l'EDC. Bien que certaines avancées aient été réalisées, des obstacles subsistent et doivent être levés rapidement. Si la BECSC et la DACCS sont perçues comme les principales méthodes d'EDC, un manque de connaissance de la filière a été relevé à de nombreuses reprises. De nombreuses études de potentiel ou d'impact sont préconisées pour permettre à la filière de gagner en notoriété.

Pour surmonter ces défis, des stratégies de financement adéquates sont nécessaires, avec un accent sur les investissements et les incitations financières alignés sur les objectifs climatiques. Une collaboration étroite entre différents acteurs, qu'ils soient gouvernementaux, institutionnels, ou de la société civile, est indispensable selon le panel interviewé pour relever ces défis et réaliser les ambitions climatiques fixées.

Associations

Concernant le CSC et ainsi le BECSC, le Réseau Action Climat estime qu'il s'agit d'une solution de dernier recours à utiliser uniquement pour les émissions incompressibles : « *l'élimination du carbone de l'atmosphère, par le biais de puits naturels ou d'options technologiques, doit être considérée comme un complément aux efforts de réduction des émissions, uniquement pour les émissions incompressibles, et non comme une alternative* ». Il ajoute que « *toutes les solutions de réduction des émissions de gaz à effet de serre doivent être poussées au maximum avant de déployer cette technologie* » (70).

De plus, le Réseau Action Climat rappelle que le potentiel de stockage de CO₂ en cavité géologique est limité en France en raison de contraintes techniques, géologiques, économiques, réglementaires et sociales.

Concernant les **solutions géochimiques, GreenPeace** précise que l'Accord de Paris « *n'écarte pas les fausses solutions, comme le nucléaire, les mécanismes de stockage de carbone et la géo-ingénierie* » (71).

Par ailleurs, la **Confédération Paysanne** souhaite un « *moratoire sur la méthanisation* » estimant que « *sur le terrain, de nombreux problèmes ont été mis en évidence : renchérissement du foncier, investissements importants sur les fermes qui risquent de figer les systèmes, concurrence entre cultures alimentaire et énergétique, gestion des digestats et risques accidentels sanitaires et environnementaux, notamment au cours des phases d'exploitation et de maintenance* ». Ce positionnement nuirait au développement des méthodes d'EDC comme le BECSC (72).

Néanmoins, bien que le Réseau Action Climat et Greenpeace soient sceptiques quant aux méthodes d'EDC comme la BECSC, la DACCS et les solutions géochimiques, d'autres associations souhaitent privilégier les solutions d'EDC.

La Figure 37 résume les perceptions documentées lors de entretiens, et confirme une fois de plus une préférence pour les méthodes basées sur les écosystèmes.

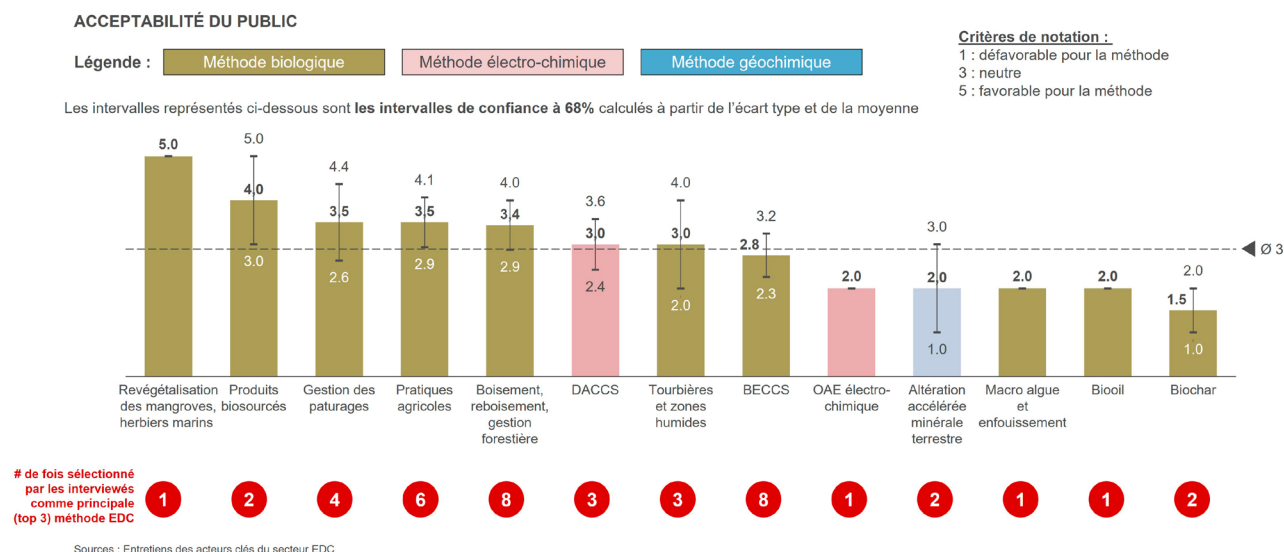


Figure 37 – Evaluation du niveau d'acceptabilité des différentes méthodes d'EDC selon les personnes interviewées

7.3 Imaginaires et visions du monde

Dans son rapport « Transitions 2050 », l'ADEME a défini quatre scénarios (S1, S2, S3 et S4) avec des niveaux de déploiement des puits naturels et technologiques différents. Dans ce travail, l'ADEME a exploré différents imaginaires possibles liés à la transition écologique. Ces imaginaires influencent la perception des citoyens et des décideurs sur les enjeux environnementaux et donc les stratégies qui seront privilégiées dans l'action climatique, notamment celles liées aux puits de carbone naturels et aux puits de carbone technologiques.

Selon l'ADEME, « Les scénarios portent en eux des visions différentes du monde qui peuvent être nourries par différentes idéologies, au sens d'un ensemble plus ou moins cohérent d'idées, de croyances et de doctrines propre à une époque, une société, des individus et qui oriente l'action. La symbolique est toujours plus ou moins présente dans la perception des scénarios et leur comparaison. Elle peut orienter la préférence pour une stratégie, une perception du faisable et du souhaitable selon une vision sociétale de la transition écologique » (20).

Le rapport distingue quatre niveaux d'analyse : les métaphores, les visions du monde, le système et la litanie. Les métaphores et les mythes désignent des récits fondateurs et des références culturelles inconscientes qui influencent les visions du monde des citoyens. Ces visions du monde influencent la perception du système dans lequel les humains vivent. Cette perception du fonctionnement du système influence enfin les discours portés sur l'état du monde et les solutions à mettre en œuvre (litanies). Ainsi selon l'évolution des mythes et des visions du monde de la population française, certaines méthodes d'EDC seraient privilégiées plutôt que d'autres.

Selon l'ADEME, ces imaginaires se traduiraient par des évolutions différentes en termes de mode de vie des citoyens et des modèles économiques.

	S1	S2	S3	S4
Modèle économique	<ul style="list-style-type: none"> Moindre attention à la croissance du PIB qu'à d'autres indicateurs sur le contenu de la croissance 	<ul style="list-style-type: none"> Croissance plus qualitative que quantitative « Réindustrialisation » de secteurs clés Redistribution 	<ul style="list-style-type: none"> Verdissement de la croissance Poursuite de la tertiarisation de l'économie Métropolisation et techno push Politique d'offre 	<ul style="list-style-type: none"> Activité encore relativement carbonée Réduction de la pauvreté par une forte croissance
Modes de vie	<ul style="list-style-type: none"> Frugalité Préférence pour le local Transparence de la gouvernance, des chaînes d'approvisionnement, etc. Recherche de sens 	<ul style="list-style-type: none"> Redistribution Évolution plus soutenable des modes de vie Recherche d'accès aux usages plutôt qu'à la propriété des objets 	<ul style="list-style-type: none"> Consumérisme vert Société connectée 	<ul style="list-style-type: none"> Diffusion et amplification du modèle de consommation individuelle de masse

Tableau 10 - Influence des imaginaires sur le modèle économique et les modes de vie (ADEME, Transitions 2050 2021)

Ces imaginaires et nos nouveaux modes de vie et modèles économiques devraient influencer le développement des méthodes d'EDC selon l'ADEME.



	S1	S2	S3	S4
Conversion de la biomasse				
BECSC	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de BECSC • Réduction de l'utilisation de la biomasse pour l'énergie • Pas de stockage géologique de CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> • BECSC considérée que sur les unités industrielles ayant mis en œuvre du CSC et utilisant du gaz réseau à forte proportion de renouvelable en 2050 	<ul style="list-style-type: none"> • BECSC mise en place en particulier sur les chaudières biomasse et les industriels avec CSC • Développement plus important de la demande en biomasse pour des unités de taille moyenne de chaudières 	<ul style="list-style-type: none"> • Fort développement du CSC et de la BECSC sur tout le territoire grâce au développement des infrastructures nécessaires (canalisations de CO₂, stockage géologique) • Large utilisation de la biomasse pour la production d'énergie
Biochar	• Non mentionné	• Non mentionné	• Non mentionné	• Non mentionné
Produits bois	• Mentionné	• Mentionné	• Mentionné	• Mentionné
Algues enfouies	• Non mentionné	• Non mentionné	• Non mentionné	• Non mentionné
Meilleure gestion des écosystèmes				
Evolution superficies terrestres	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction drastique de l'artificialisation des sols • Forte afforestation 	<ul style="list-style-type: none"> • Artificialisation des sols fortement réduite 		<ul style="list-style-type: none"> • Puits naturel le plus faible • Rythme d'artificialisation maintenu par rapport à l'actuel • Tendance au retournement des prairies au profit des céréales se poursuit
Evolution superficies marines	• Mangroves et herbiers non mentionnés	• Mangroves et herbiers non mentionnés	• Mangroves et herbiers non mentionnés	• Mangroves et herbiers non mentionnés
Pratiques stockantes	<ul style="list-style-type: none"> • Maximisation du rôle de stockage de carbone dans les écosystèmes, tout particulièrement forestiers 	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution des pratiques agricoles pour favoriser le stockage de carbone dans les sols (l'implantation de haies, agroforesterie intra parcellaire, développement des couverts végétaux) • Niveaux de prélèvements de bois en forêts modérés 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction du puits forestier par rapport à S1 et S2 • Séquestration du carbone dans les sols principalement porté par le développement des couverts végétaux, notamment valorisés en méthanisation • Haies et agroforesterie se développent moins qu'en S1 et S2 	<ul style="list-style-type: none"> • Sols cultivés augmentent faiblement les stocks de carbone via le développement des couverts végétaux, en lien avec la méthanisation
Géochimiques	• Non mentionné	• Non mentionné	• Non mentionné	• Non mentionné
Electro-chimiques	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de DACCS • Non mention du DOCCS 	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de DACCS • Non mention du DOCCS 	<ul style="list-style-type: none"> • DACCS faiblement utilisée (6 TWh/an en 2050) • Non mention du DOCCS 	<ul style="list-style-type: none"> • DACCS fortement mise en œuvre (50 TWh/an en 2050)

Tableau 11 – Influence des imaginaires sur le développement des solutions EDC dans les scénarios de l'ADEME (ADEME, Transitions 2050, 2021)

Ainsi selon ces comparaisons, un imaginaire de croissance économique infinie et de *techno-solutionnisme* (« la technologie est la solution à tous les problèmes ») conduirait plutôt à des méthodes d'EDC technologiques comme la DACCS et la BECSC, tandis que des imaginaires portés sur une logique de planification orchestrée, d'indicateurs de bien-être, de protection de la nature, de retour à la terre, conduirait plutôt à des méthodes d'EDC comme les changements d'occupation des sols (afforestation, réduction de l'artificialisation des sols) et les pratiques stockantes (forestières, prairies et agricoles).

Concernant les solutions géochimiques et leur impact incertain sur la biodiversité, l'ADEME ne fournit pas d'informations à ce sujet, mais il semble envisageable qu'un imaginaire porté sur le génie technologique humain et la croissance infinie soit plus favorable à ces solutions qu'un imaginaire de sobriété et de protection de la nature.

8. Potentiel pratique d'EDC déployable en France

Dans cette partie, le potentiel théorique estimé en partie 6 du rapport est utilisé comme point de départ et les hypothèses sont ajustées pour prendre en compte les réalités socio-économiques décrites dans la partie 7, et aboutir à un potentiel pratique, c'est-à-dire envisageable sans modifications radicales des conditions actuelles. Pour que cette estimation soit la plus réaliste possible, des hypothèses et estimations conservatrices ont été réalisées, afin de créer des marges de sécurité. Dans ce cadre, plusieurs scénarios restent cependant possibles, principalement en fonction du niveau d'ambition dont la France fera preuve. C'est ce que l'étude cherche à montrer dans cette dernière section.

8.1. Scénarios proposés

8.1.1. Présentation qualitative des scénarios

Trois scénarios sont envisagés pour le développement de l'EDC en France : Un scénario de **référence** permettant l'atteinte de la neutralité carbone à horizon 2050 avec une capacité d'élimination d'environ $\sim 76 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$; Un scénario **ambition** permettant d'atteindre une capacité d'environ $146 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$, ce qui équivaut à un bilan net négatif pour la France avant 2050 ; Et enfin un scénario **conservateur** explorant le résultat du statu quo et qui se base uniquement sur les puits naturels, avec l'hypothèse qu'aucunes mesures significatives n'auraient été mises en place pour diversifier les méthodes d'EDC.

Scénario de référence

Le scénario de '**référence**' permet de satisfaire la neutralité carbone d'ici 2050 en respectant le principe de correspondance entre émissions compensées et permanence de l'EDC (like-for-like en anglais), avec un puits de carbone total de $\sim 76 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$ incluant les puits naturels, et les différentes méthodes d'EDC. A la différence des scénarios existants (ADEME et SNBC 2), celui-ci envisage **une diversification plus grande des puits mobilisés** pour atteindre la neutralité carbone, et fait davantage de place à l'EDC permanente pour se rapprocher d'un objectif de neutralité carbone durable selon le principe de correspondance entre émissions résiduelles et EDC. Cette diversification est gage de sécurité.

Ce scénario comporte une petite **marge de sécurité** pour l'atteinte des objectifs de décarbonation anticipé par l'ADEME puisque les puits totalisent $76 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$ en 2050 pour $70 \text{ MtCO}_{2\text{eq}}/\text{an}$ d'émissions résiduelles (voir plus bas).

Dans ce scénario, les politiques d'EDC françaises, les investissements, et l'adhésion publique sont suffisantes pour atteindre la neutralité carbone. Le label bas carbone, et le marché de compensation carbone en général, permettent de financer les changements de pratiques stockantes agricoles. Les études géologiques nécessaires pour habilitier le stockage géologique de CO_2 sont entreprises à temps, ce qui rend possible la mise en œuvre de la BECSC, et de la DACCS. Enfin le rythme d'installation de panneaux photovoltaïques a été accéléré afin d'avoir de l'électricité renouvelable disponible pour la DACCS à l'horizon 2050.

Scénario ambition

Le deuxième scénario, dénommé '**ambition**', correspond à un scénario où la France investit de manière plus volontariste dans l'EDC que dans le scénario de référence. L'EDC est développée au-delà des besoins de la neutralité carbone, toujours en accord avec la notion de *like-for-like*, avec un puits de carbone total, d'environ 146 MtCO_{2eq}/an, plus du double des 70 MtCO_{2eq} nécessaires à la neutralité carbone.

Ce scénario permet à la France soit de dépasser ses objectifs en termes de décarbonation et donc de valoriser des émissions négatives auprès d'autres pays, soit de compenser un niveau d'émissions résiduelles plus élevé que prévu, dû à des retards et/ou des difficultés accrues pour réduire les émissions de certains secteurs.

La tonne de CO₂ sur le marché de compensation carbone s'échange à des prix plus élevés que dans le scénario de référence et permet de mieux financer les différentes méthodes d'EDC notamment les pratiques stockantes agricoles, le biochar, la BECSC et la DACCS. Le stockage géologique de CO₂ est davantage développé que dans le scénario de référence avec plus d'investissements dans la recherche et les études de faisabilité géologiques, favorisant ainsi la BECSC et la DACCS. Les capacités de production d'électricité renouvelable sont davantage développées pour permettre un déploiement plus important des méthodes d'EDC reposant principalement sur la consommation d'électricité.

Scénario conservateur

Le troisième scénario, appelé '**conservateur**', correspond à un scénario où la France investit peu et plus tardivement dans l'EDC, avec des hypothèses d'adhésion publique et de maîtrise technique de certaines technologies d'EDC plus faibles. Ce scénario considère que le potentiel de puits de carbone naturel hors EDC est similaire au scénario de référence.

Dans ce scénario, la France n'a pas investi suffisamment pour développer son parc de production d'électricité et l'équilibre entre l'offre et la demande reste difficile en 2050, ne laissant aucun volume d'électricité disponible pour l'EDC, en particulier la DACCS. Par ailleurs, même si le stockage géologique est maîtrisé en Europe, les capacités exploitées sont exclusivement réservées au stockage de CO₂ fossile capté par CSC, ne laissant pas de place au développement de la BECSC et de la DACCS.

D'autre part, la rémunération des agriculteurs pour mettre en œuvre les pratiques stockantes est plus faible que dans le scénario de référence. En conséquence, moins d'agriculteurs changent leurs pratiques.

8.1.2. Bilan des émissions de CO₂ à l'horizon 2050 selon l'ADEME et la SNBC 2

Dans la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC 2) le volume d'émissions résiduelles à compenser pour atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 s'élève à environ 80 MtCO_{2eq}/an. Pour les compenser, la SNBC 2 proposait d'employer comme puits de carbone les écosystèmes gérés par l'homme (forêts et terres agricoles), les produits et matériaux de la bioéconomie basés sur la matière végétale (bois et paille), et les processus industriels (captage et stockage du carbone, CSC).

Dans la SNBC 2, mais aussi dans les scénarios ADEME (à l'exception du S4 de l'ADEME) ce sont les puits naturels et l'EDC temporaire qui permettent de compenser la majeure partie des émissions résiduelles Figure 38.

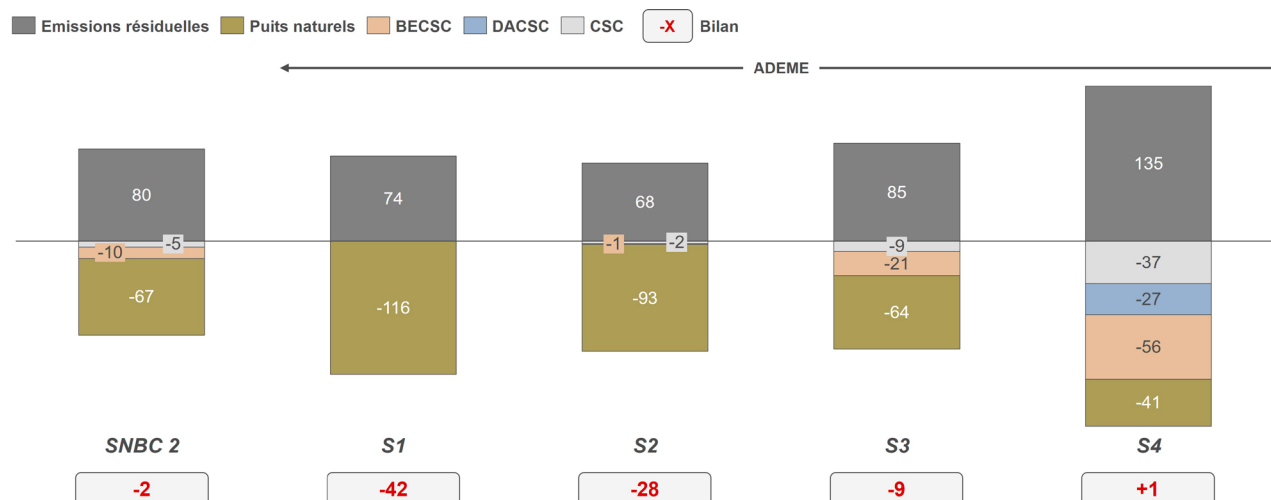


Figure 38 – Bilan des émissions de CO₂ équivalent (MtCO_{2eq}/an) en 2050 selon les scénarios de l'ADEME Transitions 2050 et la SNBC 2

Par ailleurs, selon l'ADEME, les scénarios S1, S2 et S3 envisagent un puits total d'une capacité supérieure aux émissions résiduelles nettes de CSC en 2050. La France irait ainsi au-delà de la neutralité carbone en 2050 dans ces scénarios tandis que le S4 vise tout juste la neutralité carbone.

Dans la suite du rapport, quel que soit le scénario considéré, les émissions résiduelles sont estimées à 80 MtCO_{2e}/an en cohérence avec la SNBC 2, et un volume de CSC estimé à ~10 MtCO_{2e}/an est retranché en cohérence avec le S3 de l'ADEME notamment. **Par conséquent, atteindre la neutralité carbone requiert des puits de carbone d'une capacité totale de 70 MtCO_{2e}/an.**

La SNBC 2 utilise les résultats et la méthodologie développés dans le bilan des émissions en France réalisé par le Citepa (édition 2023) pour l'analyse historique des émissions. La trajectoire future de réduction des émissions anticipée par la SNBC 2 garde la même catégorisation. Par conséquent, il est possible de distinguer les sources d'émission résiduelles, notamment entre sources biogéniques ou fossiles. Les émissions de CO₂ biogéniques sont toutes comptabilisées dans le secteur des UTCATF ou réduites à 0 à l'exception des émissions du secteur agricole. A l'horizon 2050, toujours selon la SNBC 2, la totalité des émissions du secteur agricole sont liées aux élevages et aux cultures. Ainsi, ces émissions peuvent être caractérisées comme des émissions biogéniques, et représentent 48 MtCO_{2eq} en 2050. A l'inverse, les émissions de tous les autres secteurs (Industrie, Bâtiments, Déchets, Energie et Transport) sont considérées comme fossiles, et s'élèvent à 32 MtCO_{2eq}.

La réalisation des 10 MtCO_{2eq} de CSC pour l'industrie permet de compenser des émissions fossiles. Sur les 70MtCO_{2eq} à compenser en 2050, il reste donc 22 MtCO_{2eq} d'émissions résiduelle d'origine fossile qui requièrent d'être compensées par de l'EDC permanente, et 48 MtCO_{2eq} d'origine biogénique qui peuvent se contenter d'une permanence faible.

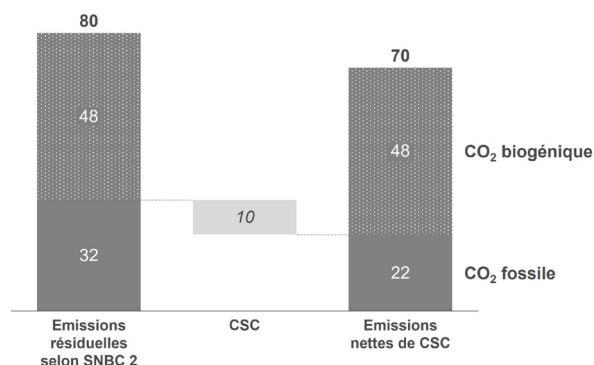


Figure 39 – Catégorisation des Emissions résiduelles selon la SNBC 2 pour estimer les besoins en EDC permanente et non-permanente

8.2. Résultats

Dans le scénario de référence, le puits de carbone total (hors CSC) est de 76 MtCO_{2eq}/an en 2050, constitué de 18 MtCO_{2eq}/an de puits forestier naturel et de 57 MtCO_{2eq}/an d'EDC. Les solutions de l'EDC les plus déployées sont les pratiques stockantes, la DACCS et la BECCS.

L'illustration suivante résume les capacités d'élimination déployées pour chaque méthode, la part que cela représente par rapport aux capacités théoriques, les ressources limitantes pour chacune, et les TRL de chaque méthode d'EDC. Ces potentiels d'EDC prennent en compte une contrainte sur le stockage géologique de CO₂ de 30 MtCO_{2eq}/an maximum disponibles pour la BECCS et la DACCS en 2050. En annexe 10.5 se trouve le détail concernant les facteurs limitants pour établir le scénario de référence.

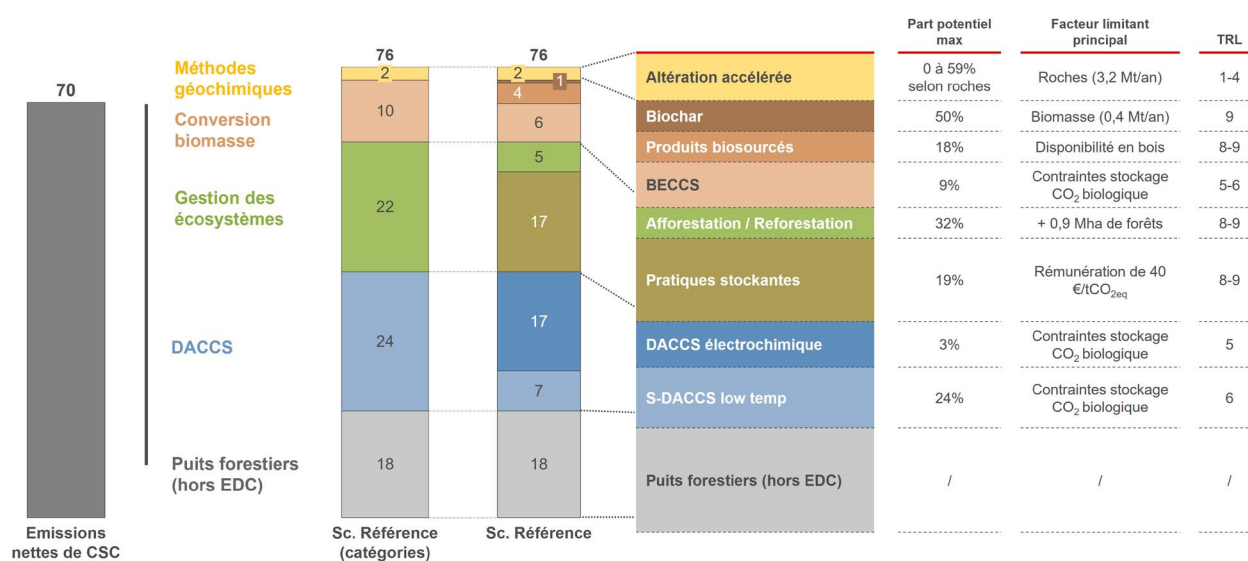


Figure 40 – Potentiel d'élimination de CO₂ des solutions de l'EDC et du puits de carbone forestier (hors EDC) dans le scénario de référence en 2050, en MtCO_{2eq}/an

En ce qui concerne le niveau de permanence de l'EDC mobilisée, la notion de *like for like* (concept détaillé en annexe 10.6) est respectée dans le scénario de référence, voire dépassée, comme l'illustre la Figure 41.

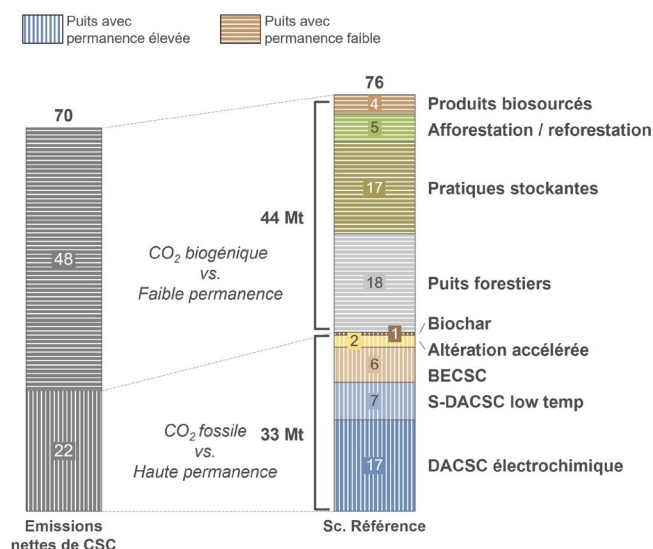


Figure 41 – Comparaison de la permanence des émissions résiduelles avec les puits envisagés

Dans le scénario **conservateur**, aucun volume d'électricité n'est disponible pour les méthodes d'EDC car l'équilibre offre-demande (électricité bas carbone ou décarbonée) en 2050 n'est pas encore atteint. En conséquence, les méthodes d'EDC comme la DACCS ne sont pas déployées. Par ailleurs, aucune capacité de stockage géologique de CO₂ pour l'EDC n'est disponible dans ce scénario, ce qui empêche également de mettre en œuvre de la BECSC. D'autre part, la rémunération des agriculteurs pour mettre en œuvre les pratiques stockantes est plus faible (30 €/tCO_{2eq}) que dans le scénario de référence (40 €/tCO_{2eq}) et moins d'agriculteurs les mettent en œuvre (30% contre 50% dans le scénario de référence). Les hypothèses faites dans le scénario conservateur (statu quo) ne permettent pas de déployer de BECSC, DACCS ou méthodes géochimiques et limitent l'ampleur des pratiques stockantes. En conséquence, seule une capacité de 33 MtCO₂/an est disponible en 2050 et la France échoue à atteindre la neutralité carbone à temps.

Inversement, dans le scénario **ambition**, davantage d'électricité renouvelable est disponible pour l'EDC (30 TWh) que dans le scénario de référence (18 TWh) car l'acceptabilité de l'éolien (onshore et offshore) est supposée plus forte et permet une production d'électricité renouvelable additionnelle. Par ailleurs, la capacité de stockage géologique de CO₂ disponible pour la BECSC et la DACCS est supposée plus élevée (63 MtCO₂/an contre 30 MtCO₂/an dans le scénario de référence) grâce à une meilleure adhésion publique, notamment des projets de stockage onshore en France. Cela permet de déployer davantage de DACCS et de BECSC. D'autre part, la rémunération des agriculteurs pour la mise en œuvre des pratiques stockantes (120 €/tCO_{2eq}) est supposée beaucoup plus attractive que dans le scénario de référence (40 €/tCO_{2eq}). En conséquence, davantage d'agriculteurs (70%) sont prêts à faire évoluer leurs pratiques que dans le scénario de référence (50%). Enfin, le puits forestier est supposé rester le même qu'en 2021 (28 MtCO_{2eq}/an) toujours grâce à des mesures importantes de protection de la forêt.

Pour atteindre les 146 MtCO₂/an du scénario Ambition, toutes les méthodes présentes dans le scénario de référence sont mobilisées à des niveaux plus ambitieux. Il n'y a donc pas une ou deux méthodes qui seules permettent de faire la différence. C'est bien en jouant sur toutes les méthodes que l'on peut atteindre ces capacités.

A noter, que les objectifs atteints dans le scénario ambition pourraient être dépassés si la capacité de stockage géologique en CO₂ était plus importante. En effet, certaines méthodes d'EDC comme la DACCS ou la BECSC sont contraintes non pas par la disponibilité de la ressource (électricité renouvelable et CO₂ biogénique respectivement) mais par la capacité à stocker de manière durable le CO₂ capturé. Par ailleurs, certaines méthodes n'ont pas été prises en compte car jugées trop peu matures aujourd'hui ou trop peu documentées pour faire l'objet d'une estimation du gisement comme l'enfouissement des algues, les pompes artificielles de surface ou encore l'alcalinisation des océans. D'ici 2050, ces technologies pourraient progresser et apporter des capacités supplémentaires d'élimination du CO₂ atmosphérique. Elles pourront, par exemple, être détaillée plus amplement dans une prochaine version du rapport si le gain de maturité ou la littérature se sont suffisamment développés. Par ailleurs, par précaution sur l'estimation de certains gisements, certaines technologies n'ont pas été retenues. C'est le cas par exemple de la production de chaleur et/ou d'électricité bas carbone à partir de réacteur nucléaire modulaire de petite taille. Ainsi si ces technologies atteignent rapidement un niveau de maturité suffisant, elles pourraient augmenter la taille du gisement exploitable par les différentes méthodes d'EDC et donc permettre à la France, si elle s'en donne les moyens, d'accroître encore le potentiel exploitable d'EDC.

La Figure 42 permet de visualiser et comparer les trois scénarios proposés, notamment par rapport au volume d'émissions résiduelles considéré pour 2050.

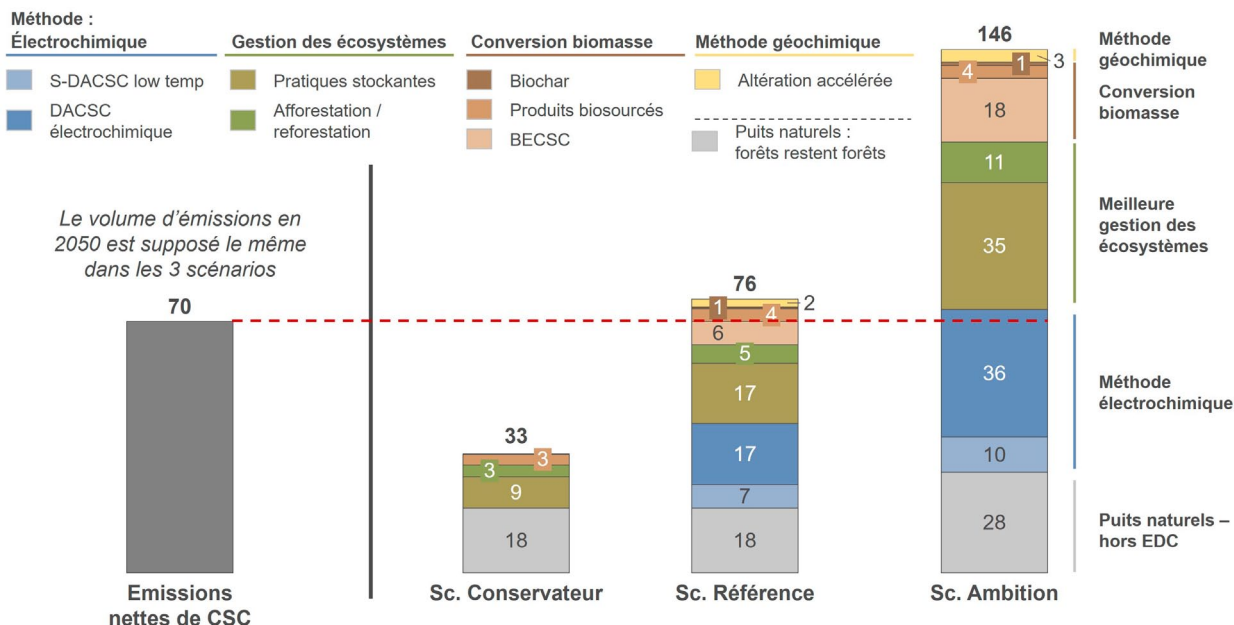


Figure 42 – Composition du puits de carbone total des scénarios conservateur, référence et ambition en 2050, comparé au volume d'émissions résiduelles anticipé par la SNBC 2, en MtCO_{2eq}/an

Comme dans le scénario de référence, la correspondance entre l'origine des émissions résiduelles et le niveau de permanence de l'EDC mobilisée pour les compenser (notion de like-for-like) est respectée et même dépassée dans le scénario ambition, i.e. les puits de carbone avec une permanence élevée permettent de compenser toutes les émissions résiduelles fossiles, et de d'avoir un volume supplémentaire disponible pour compenser des émissions historiques.

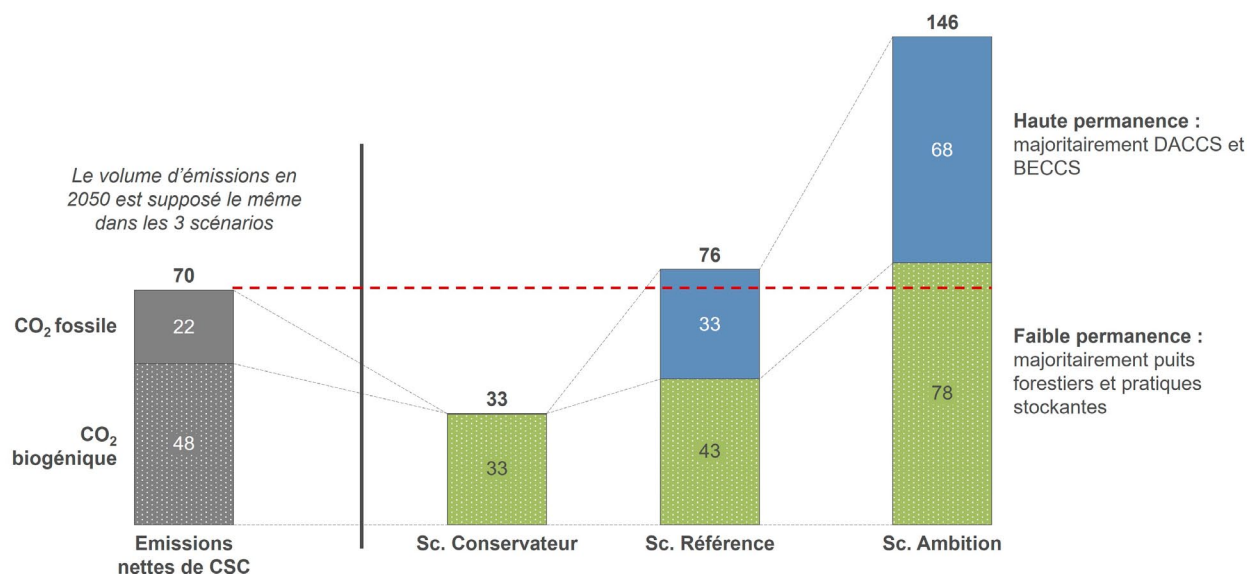


Figure 43 – Comparaison de l'origine des émissions résiduelles avec la permanence des puits de carbone mobilisés dans les trois scénarios considérés

Les principales différences entre les scénarios viennent du gisement en électricité, de la capacité de stockage géologique de CO₂, de la rémunération des pratiques stockantes, de l'augmentation des superficies forestières et de l'évolution du puits forestier actuel (hors EDC) à l'horizon 2050.

Les scénarios référence et ambition reposent de manière assez équilibrée sur les puits naturels (env. 60% du puits total dans sc. référence) et technologiques à l'image du scénario S4 de l'ADEME. A l'inverse, la SNBC 2 et les scénarios S1, S2 et S3 de l'ADEME misent essentiellement sur les puits naturels pour compenser les émissions anthropogéniques.

Concernant la CSC, les volumes envisagés dans cette étude sont supérieurs à la SNBC 2 et aux scénarios S1, S2 de l'ADEME mais sont cohérents avec le scénario S3 (9 Mt CO_{2eq}). Les volumes de CSC dans le scénario S4 de l'ADEME sont plus de trois fois supérieurs (Figure 44).

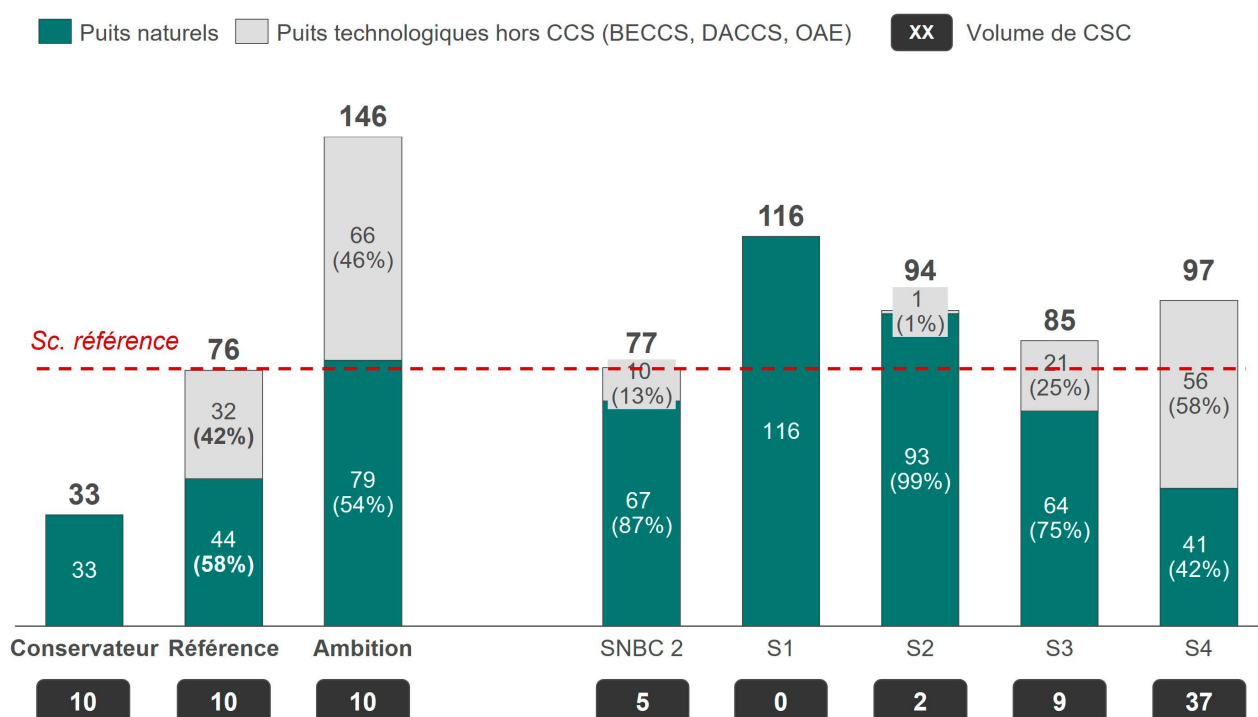


Figure 44 - Puits (hors CSC) en 2050 selon les scénarios conservateur, référence et ambition, ceux de l'ADEME (S1, S2, S3, S4) et de la SNBC 2, en MtCO_{2eq}/an

Pour ce qui est des puits naturels, le scénario de référence mise sur des volumes similaires au scénario S4 de l'ADEME, mais bien inférieurs à ceux envisagés dans les autres scénario ADEME ou dans la SNBC 2. Ces différences s'expliquent en partie par l'évolution du puits forestier actuel (hors EDC), dont l'état semble se détériorer plus rapidement que ce qui a été anticipé dans les trois premiers scénarios de l'ADEME (35 à 74 MtCO_{2eq}/an). Le détail pour les puits naturels est représenté sur la Figure 45.

Les scénarios de cette étude et les scénarios ADEME misent sur des volumes similaires d'élimination par les produits bois (3 à 4 MtCO₂/an), bien loin des 21 MtCO₂/an de la SNBC 2.

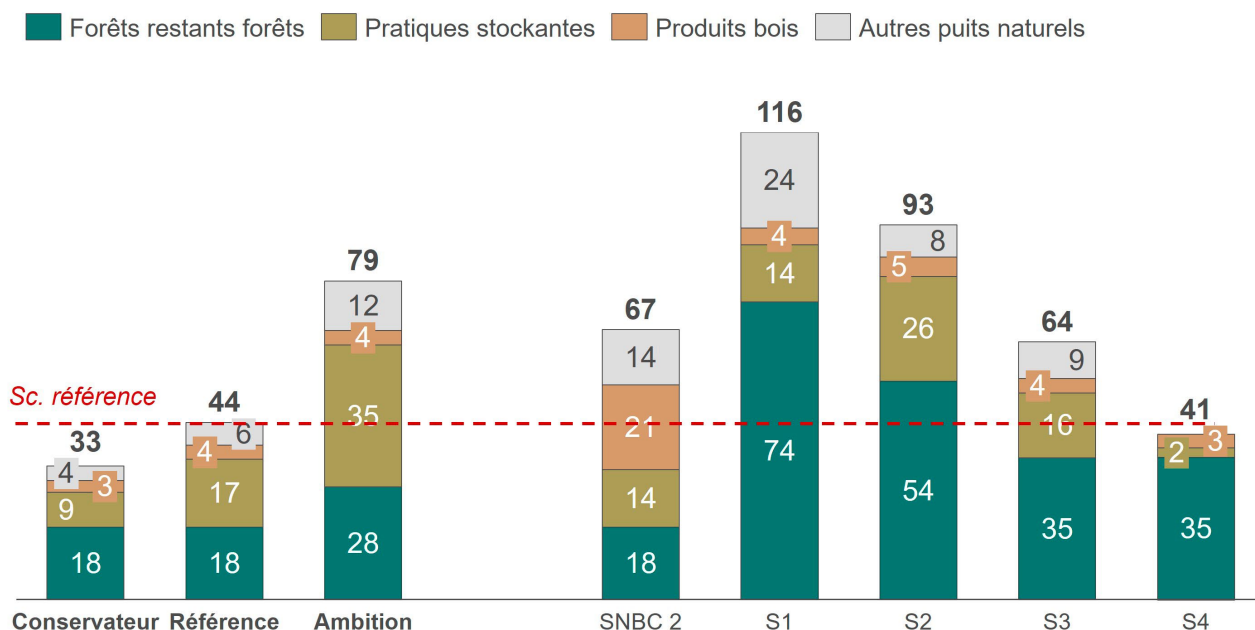


Figure 45 – Puits naturels en 2050 selon les scénarios conservateurs, référence et ambition, ceux de l'ADEME (S1, S2, S3, S4) de la SNBC 2, en MtCO_{2eq}/an

Sur les puits technologiques, le scénario de référence est globalement plus ambitieux que la vision de la SNBC 2 et de l'ADEME (hors S3 et S4) (Figure 46). Ces différences s'expliquent en grande partie par l'absence de DACCS dans la SNBC 2 et les trois premiers scénarios de l'ADEME. Ni la SNBC 2, ni les scénarios de l'ADEME n'envisagent d'altération accélérée.

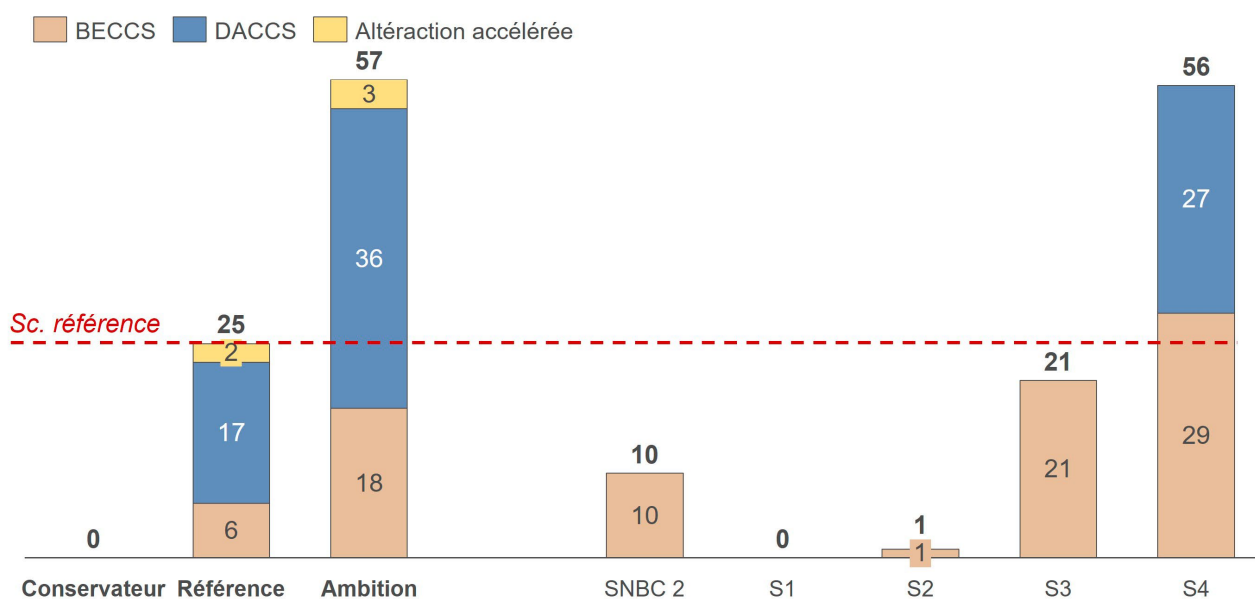


Figure 46 – Puits technologiques (hors CSC) en 2050 selon les scénarios conservateur, référence et ambition, ceux de l'ADEME (S1, S2, S3, S4) de la SNBC, en MtCO₂/an

8.3. Méthodologie

Pour chaque scénario et pour chaque méthode d'EDC, il s'agit d'estimer la part du gisement théorique utile pour chaque technologie d'EDC, pour ensuite en déduire en multipliant par le facteur de conversion le potentiel plausible d'EDC pour 2050. Le potentiel d'EDC en 2030 est calculé de la même façon.

8.3.1. DACCS et altération accélérée

8.3.1.1. Gisement exploitable de chaleur

Dans le scénario de référence, la quantité de chaleur disponible pour l'EDC (S-DACCS low temp) est de 17 TWh_{th}/an en 2050. Dans le scénario ambition la chaleur est évaluée à 20 TWh mais aucune chaleur n'est disponible pour l'EDC dans le scénario conservateur. Cette quantité de chaleur provient de l'ajout de contraintes techniques et d'adhésion publique au gisement de chaleur de 53 TWh estimé en partie 4.

L'usage de la chaleur fatale par des réseaux de chaleur a été considéré comme prioritaire sur de l'EDC. Selon le ministère de la transition écologique, le gisement de chaleur fatale à proximité des réseaux de chaleur d'une température supérieure à 60°C est estimé à environ 17 TWh_{th}/an. Puisque cette chaleur peut rentrer en partie en compétition avec les besoins en chaleur (de température > 80°C) de la S-DACCS, cette chaleur a été retranchée du gisement de chaleur fatale pour être prudents. La quantité de chaleur potentielle pour l'EDC restante est donc de 36 TWh/an.

Tous les sites industriels avec de la chaleur fatale ne sont pas propices à l'installation d'une technologie de S-DACCS. En effet, la problématique principale de la S-DACCS est le stockage géologique du CO₂ capté. Il faut une infrastructure de transport vers des puits d'enfouissement du CO₂ à proximité pour limiter les coûts de la technologie. Le rapport de l'ADEME (49) analyse les sites industriels avec un potentiel de CSC. Selon cette étude, 16% du volume de CO₂ émis par les industries en France se trouveraient trop éloignés des sites d'enfouissement géologique de CO₂. En supposant que les gisements de chaleur fatale sont localisés au même endroit que les sites émetteurs de CO₂ concernés par ce document de l'ADEME, et équitablement répartis, 16% de la chaleur restante serait ainsi supposée produite par des sites industriels situés trop loin des sites de stockage géologique de CO₂. Ils sont ainsi retranchés de la quantité de chaleur potentielle restante, ce qui donne une valeur restante de 30 TWh_{th}/an.

Ensuite, le document de l'ADEME estime que 44% des émissions de CO₂ restantes (après le critère géographique précédent) des industriels pouvant potentiellement être équipés de CSC se trouvent émises par des unités à proximité d'un site de stockage de CO₂ non accepté socialement. En supposant toujours que les gisements de chaleur sont localisés au même endroit que les sites industriels mentionnés dans le document de l'ADEME, 44% de la chaleur fatale restante (13 TWh_{th}) est supposée produite par des sites à proximité d'un site de stockage géologique non accepté socialement. Cette quantité est également retranchée de la quantité de chaleur potentielle restante, ce qui donne une quantité finalement disponible pour de la S-DACCS de 17 TWh_{th}/an en 2050 (Figure 47).

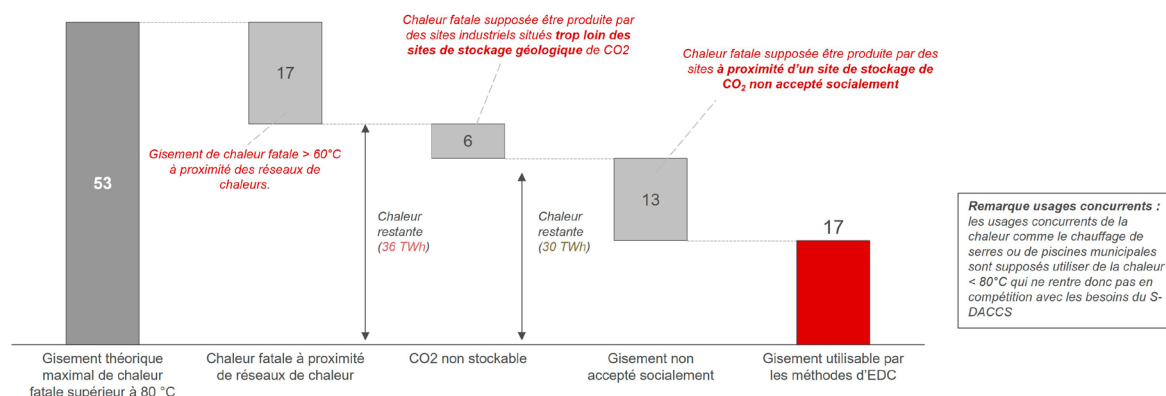


Figure 47 – Estimation du gisement de chaleur fatale disponible pour l'EDC en 2050 dans le scénario de référence, [TWh/an]

Dans le scénario ambition, l'adhésion publique est supposée meilleure. Ainsi le gisement de chaleur fatale qui peut être exploité pour réaliser de la S-DACCS est évalué à 20 TWh_{th}.

8.3.1.2. Roches

Dans le scénario de référence, les volumes de roches disponibles pour l'EDC sont de 3 Mt/an de calcaire et de 0,18 Mt/an de dolomie. Aucun volume d'olivine ne serait disponible car aucune mine ne serait ouverte dans les prochaines années. Le CKD ne serait pas utilisé dans ce scénario à cause des risques de l'épandage de cette roche pour la biodiversité. Ces volumes de roches permettraient d'absorber 1,9 MtCO₂/an en 2050.

Dans le scénario ambition, les volumes de roches disponibles pour l'EDC permettraient d'absorber ~2,6 MtCO₂/an respectivement.

Dans le scénario conservateur, malgré une disponibilité de certaines roches, l'absence de gisement pour l'électricité empêche de concasser les roches et donc d'exploiter ce gisement d'EDC.

La méthodologie d'estimation de ces volumes selon les scénarios dépend de la roche considérée.

Pour le **calcaire**, le scénario de référence fait l'hypothèse que toutes les usines de production de chaux agricole seraient équipées de CSC en 2050 et qu'il n'y a pas d'augmentation de la production de calcaire pour réaliser de l'EDC en 2050. Aujourd'hui, 3,0 Mt/an de calcaire sont produits chaque année pour être calcinés afin de produire de la chaux dispersée dans les champs comme amendement agricole. Sans production supplémentaire de chaux comme amendements, ce volume resterait de 3,0 Mt/an en 2050. Avec l'ajout de CSC sur toutes les unités de production de chaux, le carbone émis lors de la calcination est capté et l'épandage de chaux comme amendements agricoles permettrait bien de générer des émissions négatives de CO₂ et donc de l'EDC. Cet ajout de CSC est inclus dans les 10 MtCO₂/an de CSC envisagés dans le scénario de référence.

Pour le **Basalte**, le scénario de référence considère une production nationale à hauteur de 10Mt (valeur basse de la production estimée par ClimeRock) et que 10% de cette production est adaptée (particules fines, sous-produits du concassage) et fléchée vers l'altération accélérée permettant de retirer 0,3Mt CO₂ de l'atmosphère.

Pour la **dolomie**, le volume disponible pour l'EDC dans le scénario de référence serait de 0,09 Mt/an, ce qui correspond à une augmentation de 5% de la production annuelle actuelle (1,8 Mt/an).

Pour l'**olivine**, aucun volume ne serait disponible pour l'EDC en 2050 dans le scénario de référence car il ne suppose pas d'ouverture de mines d'olivine pour l'EDC. En effet, selon plusieurs sources publiques, le seul gisement d'olivine identifié semble être le gisement de Iherzolite des Pyrénées. Or celui-ci se situe dans un espace naturel. L'ouverture d'une mine semble ainsi peu acceptable socialement, compte tenu de l'impact environnemental d'une telle mine.

Dans le scénario de référence, le volume de **CKD** (poussières de fours de ciment) disponible pour l'EDC est considéré nul. La justification est que les externalités des CKD sur les écosystèmes sont méconnues aujourd'hui et peuvent dans certains cas être dangereuses pour la santé et l'environnement (40). Par mesure de précaution et en attendant d'avoir des études scientifiques démontrant l'absence d'externalités négatives d'épandage de CKD sur les cultures, le gisement théorique de CKD n'est pas exploité pour de l'EDC en 2050.

Dans le **scénario conservateur**, en l'absence d'électricité disponible (cf. sous partie suivante), quel que soit la quantité disponible anticipée de roches, elles ne peuvent ni être extraites ni concassées. Par conséquent, le processus d'altération accélérée ne peut avoir lieu.

Dans le **scénario ambition**, le volume total de roches disponible est de 4,5 Mt/an (toutes roches cumulées). En particulier, toutes les unités de production de chaux sont supposées équipées de CSC et le volume de production annuelle totale de calcaire en France est supposée augmenter de 10% pour faire de l'EDC, ce qui donne un volume total de calcaire de 4,2 Mt/an. Le gisement plausible de CKD (poussières de fours de ciment) est évalué cette fois à 50% du gisement maximal théorique (soit 0,13 Mt/an), il est toutefois considéré comme nul pour les mêmes raisons que dans le scénario de référence. Le volume de dolomie à une augmentation de 10% de la production nationale (soit 100% du gisement maximal théorique et 0,18 Mt/an). Le volume d'olivine est toujours supposé nul comme dans le scénario de référence.

Types de roches	Gisement théorique maximal [Mt/an]	Scénario conservateur		Scénario de référence		Scénario ambition	
		Gisement ressource [Mt/an]	Potentiel d'EDC [MtCO ₂ /an]	Gisement ressources [Mt/an]	Potentiel d'EDC [MtCO ₂ /an]	Gisement ressources [Mt/an]	Potentiel d'EDC [MtCO ₂ /an]
Calcaire	5,2	1,5	0	3,1	1,9	4,2	2,5
Basalte	3	0	0	1	0,3	3	0,9
Olivine	3,1	0	0	0	0	0	0
Dolomie	0,18	0	0	0,09	0,03	0,18	0,05
CKD	0,25	0	0	0	0	0	0
Total	11,7	1,5	0	3,2	2,2	7,5	3,5

Tableau 12 – Gisement utilisable de roches pour de l'altération accélérée en 2050 dans les trois scénarios [Mt/an]

8.3.1.3. Gisement exploitable d'électricité

Un gisement d'environ 18 TWh serait disponible pour l'EDC dans le scénario de référence, de 0 TWh pour le scénario conservateur et 30 TWh pour le scénario ambition. Ces gisements sont composés en grande majorité d'électricité photovoltaïque.

Dans le scénario de référence, les volumes d'électricité renouvelable disponibles pour l'EDC sont estimés à partir d'une comparaison de la moyenne des scénarios N1 et N2 de RTE 2050 basés sur un niveau de demande « réindustrialisation profonde » et le scénario N1, qui est légèrement plus ambitieux sur le renouvelable. Les volumes d'électricité renouvelables supplémentaires dégagés pour de l'EDC ne proviennent donc que de la comparaison des deux scénarios les plus probables du travail de RTE. De plus, seuls les volumes supplémentaires d'électricité solaire ont été retenus, sur l'hypothèse conservatrice que les volumes supplémentaires d'éolien ne sont pas déployés à cause de l'opposition sociétale.

Les difficultés d'adhésion publique de l'éolien sont visibles dès à présent, puisque la construction d'un parc éolien terrestre nécessite deux fois plus de temps en France que la moyenne européenne (sept ans en France contre trois à cinq ans dans le reste de l'Europe) principalement à cause de nombreux recours en justice (73). En outre, les objectifs de développement de l'éolien terrestre ont été revus à la baisse lors du discours de Belfort d'Emmanuel Macron en février 2022 : 37 GW d'éolien terrestre étaient prévus en 2030 dans l'actuelle PPE et ont été repoussés en 2050. Par ailleurs, les objectifs de déploiement de l'éolien en mer récemment annoncés par le SGPE (juin 2023) sont en deçà des objectifs des scénarios de RTE équilibrés entre le renouvelable et le nucléaire (N1 et N2).

La comparaison entre le scénario moyen N1 et N2 « réindustrialisation profonde » de RTE et le scénario N1 de RTE laisse entrevoir un volume d'électricité renouvelable disponible pour l'EDC d'environ 40 TWh, dont 22 TWh d'éolien et le reste de photovoltaïque et d'hydraulique (~18 TWh). Avec les difficultés d'adhésion publique de l'éolien, seuls les 18 TWh sont supposés disponibles pour l'EDC dans le scénario de référence (Figure 49).

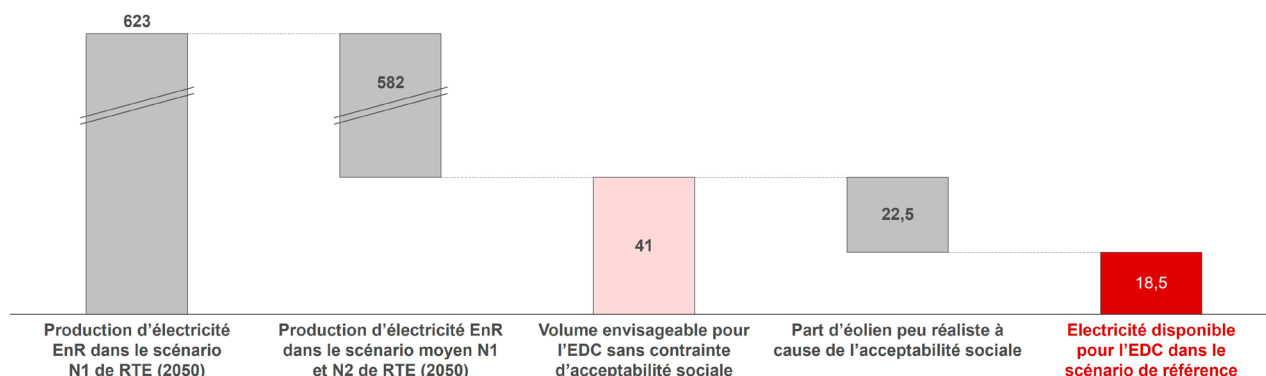


Figure 48 – Méthodologie pour estimer le volume d'électricité renouvelable disponible pour l'EDC dans le scénario de référence, TWh/an en 2050

Dans le scénario conservateur, aucun volume d'électricité n'est disponible pour l'EDC en 2050. Il est supposé en effet que pour des raisons économiques et d'adhésion publique, la production d'électricité renouvelable permet uniquement d'équilibrer la balance offre-demande d'électricité en 2050.

Dans le scénario ambition, les hypothèses principales sont les mêmes que le scénario de référence, à la différence près que les citoyens sont supposés accepter davantage de projets éoliens. Les recours en justice contre ceux-ci sont moins nombreux et il est supposé que la moitié de l'électricité éolienne issue de la comparaison entre le scénario moyen N1 et N2, et N1, est disponible pour l'EDC.

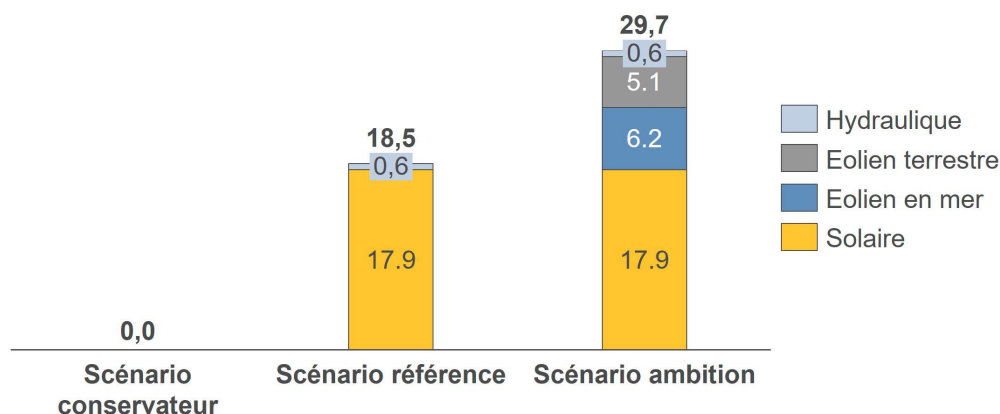


Figure 49 – Volume d'électricité disponible pour l'EDC selon les scénarios et les sources, TWh/an en 2050

Les gisements d'électricité renouvelables identifiés dans cette partie sont donc un ordre de grandeur plus faibles que le potentiel théorique maximal identifié en partie 7, et prennent en compte la réalité sociale et les particularités de la France vis-à-vis des renouvelables.

8.3.1.4. Allocation de l'électricité disponible sans contrainte de stockage

Pour répartir le gisement d'électricité de 18 TWh dans le scénario de référence, et de 30 TWh dans le scénario ambition, les méthodes d'EDC les moins chères (coûts tirés du GIEC, critère d'allocation principal) et avec les meilleurs rendements énergétiques pour la consommation d'électricité ont été priorisées. Une fois les coûts et le rendement de chaque méthode pris en compte, la ressource limitante pour chaque méthode a été évaluée. Il s'agit des roches pour l'altération accélérée, de la chaleur pour la S-DACCS, et de l'électricité pour la DACCS électrochimique. Une fois ces facteurs limitants identifiés, l'électricité allouée correspond aux conditions « stœchiométriques » pour déployer la technologie. Par exemple, la S-DACCS consomme à la fois de la chaleur et de l'électricité et ce dernier est limité par la quantité de chaleur fatale disponible : 17 TWh_{th}.

Dans le scénario de référence, le gisement d'électricité disponible de 18,5 TWh se répartit en 0.5 TWh pour l'altération accélérée à partir de calcaire et 0,4 TWh pour l'altération accélérée à partir de basalte. La mise en œuvre de la S-DACC mobilise 2,7 TWh ce qui laisse un potentiel de 14,9 TWh pour la DACCS électrochimique. Ces estimations se basent sur les facteurs limitants discutés dans les sous parties ci-dessus (8.3.1.1 à 8.3.1.3). Les besoins estimés en électricité pour les trois méthodes ci-dessus sont calculés en utilisant les mêmes facteurs de conversion qu'en partie 7. A titre d'illustration, pour la DACCS électro-chimique, la consommation d'électricité est estimée à 0.67 MWh/tCO₂. Les coûts mentionnés dans le graphique ci-dessous sont issus du rapport « *Mitigation of climate change* » du 6^{ème} rapport du GIEC (2022) (2).

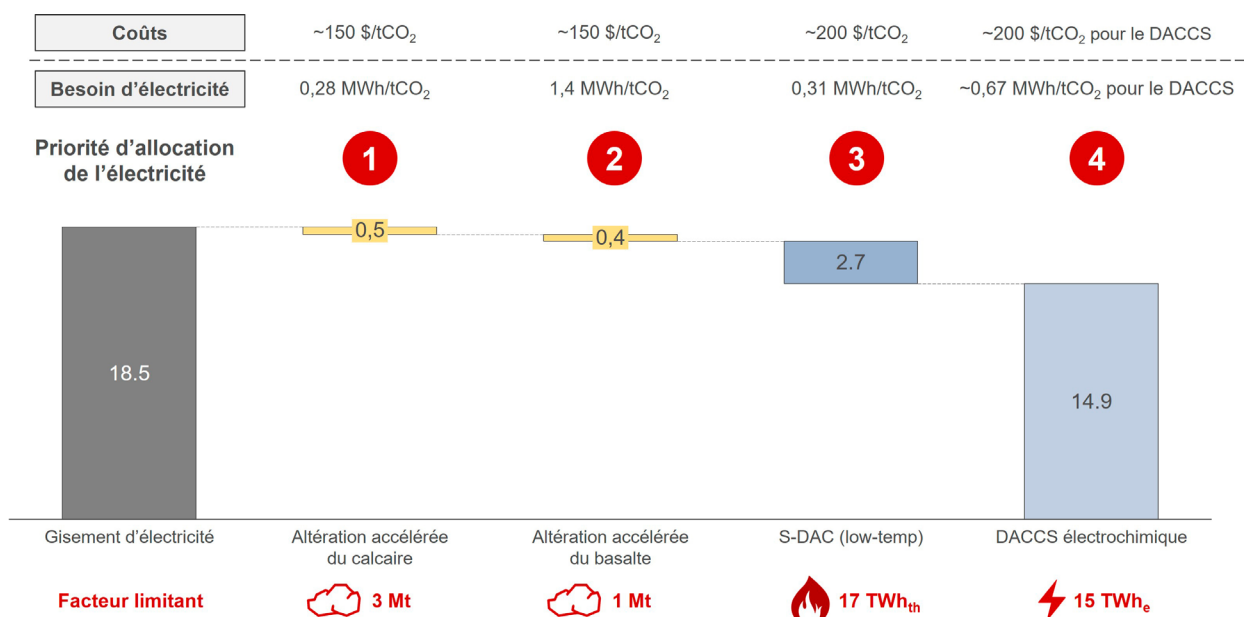


Figure 50 – Répartition du gisement d'électricité dans le scénario de référence parmi les différentes méthodes d'EDC consommant de l'électricité [TWh/an]

Dans le scénario ambition, le gisement d'électricité disponible de 30 TWh se répartit en 2 TWh pour l'altération accélérée (Calcaire + Basalte), 3 TWh pour la S-DACCS, ce qui laisse 25 TWh pour la DACCS électrochimique. Plus de détails en annexe 10.8.

Dans le scénario conservateur, il n'y a pas d'électricité décarbonée disponible pour l'EDC.

8.3.1.5. Potentiels d'EDC avec et sans contrainte de stockage géologique

Dans le scénario de référence, le potentiel d'EDC des différentes méthodes consommatrices d'électricité, présenté sur la Figure 51, culmine à **33 MtCO₂/an**. Dans le scénario ambition, le potentiel d'EDC des différentes méthodes consommatrices d'électricité, présenté en annexe 10.8, culmine à **52 MtCO₂/an**.

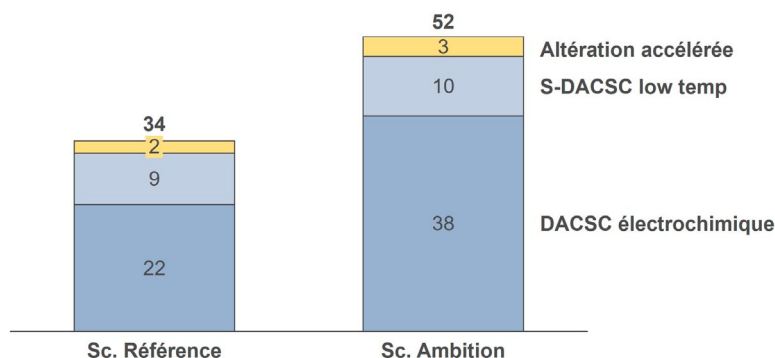


Figure 51 – Potentiel d'EDC des méthodes consommatrices d'électricité en 2050 dans le scénario de référence et ambition [MtCO₂/an]

Dans le scénario conservateur, le potentiel plausible d'EDC de la DACCS et de l'altération accélérée sont nuls, étant donné le gisement d'électricité nul dans ce scénario.

Les potentiels d'EDC présentés dans les graphiques ci-dessus prennent en compte l'électricité disponible pour chaque méthode **mais ne prennent pas en compte de contrainte de stockage géologique de CO₂** qui réduit le potentiel des méthodes comme la DACCS.

En tenant compte des contraintes de stockage géologique de CO₂, le scénario de référence passe de 31 MtCO₂/an à 24 MtCO₂/an pour les méthodes DACCS. Plus de détails sont disponibles dans la section dédiée aux limites de stockage géologique (8.3.10).

8.3.2. BECSC

La BECSC permettrait d'absorber environ 6 MtCO₂/an en 2050 dans le scénario de référence et 18 MtCO₂/an dans le scénario ambition. Il n'y a pas de BECSC dans le scénario conservateur car la France ne dispose pas de capacité de stockage géologique de CO₂.

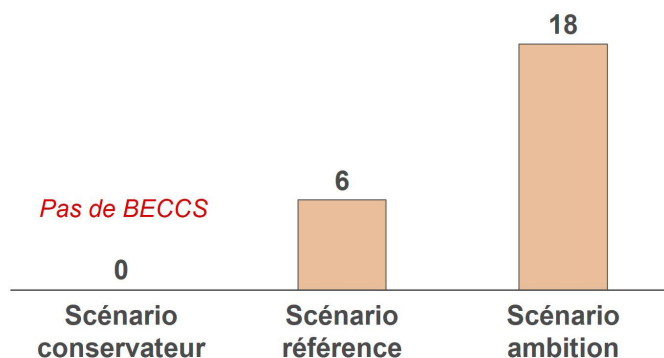


Figure 52 – Potentiel de BECSC dans les différents scénarios, en MtCO₂/an en 2050

Dans le scénario de référence, les hypothèses principales sont :

- **Un développement de la biomasse et de la BECSC pour les chaudières de taille moyenne** dans l'industrie et les réseaux de chaleur
- **Un développement de l'utilisation du biogaz avec CSC** dans l'industrie
- **La prise en compte d'une compétition de CO₂ biogénique avec l'aérien et le maritime** pour la production de carburants durables (électro-carburants) à hauteur de 7,4 MtCO₂/an pour l'aérien (dont 0,7 MtCO₂/an sont déjà vus par l'ADEME) et 5,7 MtCO₂/an pour le maritime (non vus par l'ADEME)

De façon plus détaillée, le potentiel de BECSC en 2050 du scénario de référence est issu du scénario S3 de l'ADEME dans son rapport « Transitions 2050 ». Le potentiel BECSC de ce scénario de l'ADEME est de 21 MtCO₂/an mais ne prend pas en compte de contraintes supplémentaires sur les infrastructures de transport et stockage de CO₂, d'adhésion publique, de disponibilité en biomasse et de compétition d'usage du CO₂ biogénique avec l'aérien et le maritime.

Le scénario S3 suppose un développement important de la biomasse et de la BECSC pour les unités de taille moyenne de chaudières dans l'industrie et les réseaux de chaleur (unités avec volumes d'émissions de CO₂ entre 10 et 50 ktCO₂/an), les bioraffineries et l'utilisation de biogaz pour l'industrie. Les unités équipées de BECSC sélectionnées sont concentrées et proches des sites de stockage géologique, avec une possibilité de transporter le CO₂ sur 300 km.

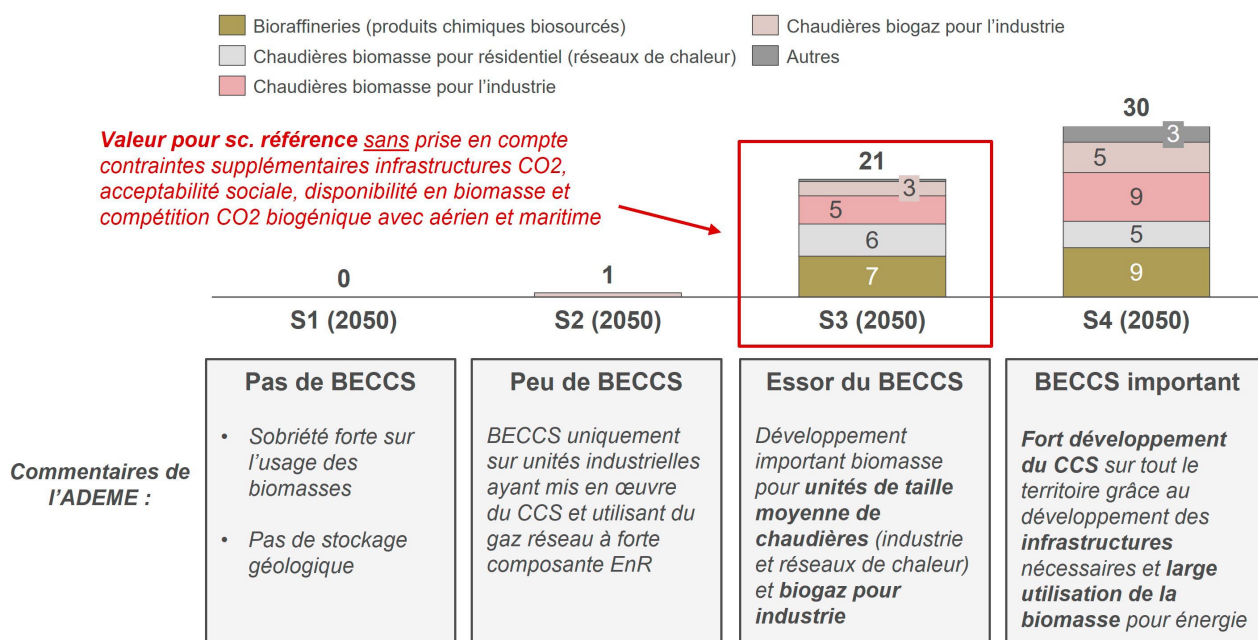


Figure 53 – Elimination de CO₂ par la BECSC en 2050 selon les scénarios de l'ADEME

Le potentiel de BECSC vu par l'ADEME dans le scénario S3 en 2050 a été réduit dans le scénario de référence en prenant en compte les besoins en CO₂ biogénique de l'aérien et du maritime pour la production de carburants durables. En effet, les acteurs de l'aérien et du maritime ont des objectifs à moyen/long terme d'incorporation de carburants durables très contraignants (pénalités fortes) selon les réglementations européennes Refuel EU Aviation et Fuel EU Maritime. Le besoin en électro-carburants a été considérablement revu à la hausse depuis la publication des scénarios de l'ADEME, or ceux-ci sont synthétisés à partir de CO₂ biogénique. Par conséquent, celui-ci serait fléché en priorité pour cet usage plutôt que vers un enfouissement géologique (BECSC).

Pour l'aérien, la consultation CCUS du gouvernement (juin 2023) envisage un volume de CO₂ biogénique de 7,4 MtCO₂/an à horizon 2050, dont 0,7 MtCO₂/an sont déjà vus par l'ADEME dans le scénario S3 du rapport « Transitions 2050 ».

Pour le maritime, le besoin en CO₂ biogénique pour la production de carburants durables a été estimé à 5,7 MtCO₂/an et n'est pas pris en compte dans le scénario S3 de l'ADEME. Le besoin en CO₂ biogénique est estimé à partir de la feuille de route de décarbonation de la filière maritime (2022) qui anticipe un besoin de ~25 TWh d'électro-carburants (e-méthane et e-méthanol pour le S3).

Au total, le potentiel de BECCS du scénario S3 de l'ADEME (21 MtCO₂/an) est réduit des 7,4 MtCO₂/an de CO₂ biogénique requis pour l'aérien selon la consultation CCUS (dont 0,7 déjà vus par l'ADEME) et de 5,7 MtCO₂/an de CO₂ biogénique requis pour le maritime. Il reste un potentiel BECCS de 8,7 MtCO₂/an dans le scénario de référence, sans contrainte de stockage. Ce potentiel est ensuite encore réduit à cause de la capacité de stockage géologique limitée (méthodologie détaillée en partie 8.3.10) de CO₂ biogénique pour atteindre le gisement plausible de 6.5 Mt CO₂.

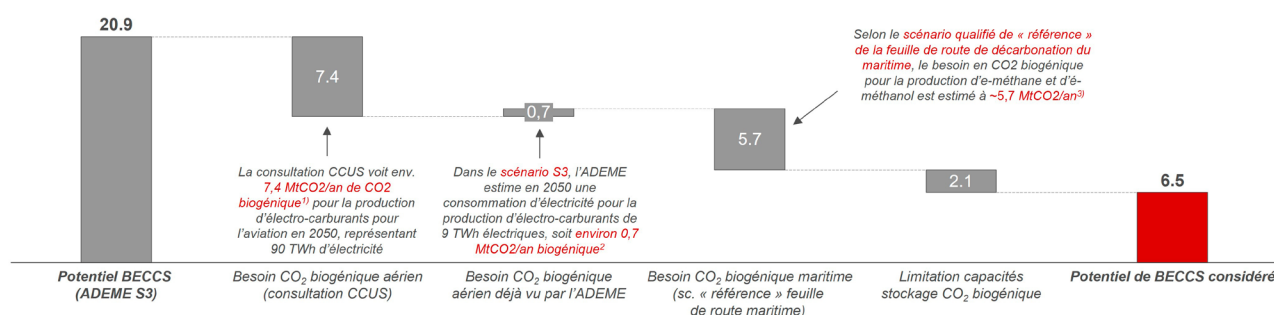


Figure 54 – Réduction du potentiel de BECCS de l'ADEME (S3) en prenant en compte la concurrence du CO₂ biogénique avec l'aérien et le maritime

Dans le **scénario conservateur**, il n'y a pas de BECCS en 2050, car la France ne dispose que de capacités de stockage de CO₂ géologique lui permettant de stocker le CO₂ d'origine fossile et non le CO₂ biogénique.

Dans le **scénario ambition**, estimé à partir du scénario S4 de l'ADEME, le potentiel de BECCS est de 18 MtCO₂/an après déduction du besoin pour les électro-carburants et la prise en compte de la contrainte sur les capacités de stockage du CO₂ biogénique. Ce scénario suppose donc un fort développement des infrastructures de transport et de stockage du CO₂ (même si elles ne sont pas encore suffisantes) sur tout le territoire ainsi qu'une large utilisation de la biomasse pour l'énergie. Le besoin en CO₂ biogénique est toujours estimé à 7,4 MtCO₂/an pour l'aérien et 5,7 MtCO₂/an pour le maritime pour la production d'électro-carburants. Cependant, à la différence du scénario S3 de l'ADEME, le scénario S4 de l'ADEME envisage un volume d'électricité de 18 TWh pour la production de carburants durables pour l'aérien en 2050, ce qui correspond à environ 1,5 MtCO₂/an biogénique en 2050 **déjà vus** par l'ADEME. Plus de détails en annexe 10.10.

8.3.3. Pratiques stockantes (hors forêts)

Les pratiques stockantes (cultures, prairies, vignes, hors forêts) absorberaient 17 MtCO_{2eq}/an dans le scénario de référence, contre 9 MtCO_{2eq}/an dans le scénario conservateur et 35 MtCO_{2eq}/an dans le scénario ambition. Les pratiques stockantes avec le plus de potentiel seraient l'agroforesterie, les cultures intermédiaires et la plantation de haies. Les autres pratiques présentent des potentiels d'élimination de CO₂ plus marginaux.

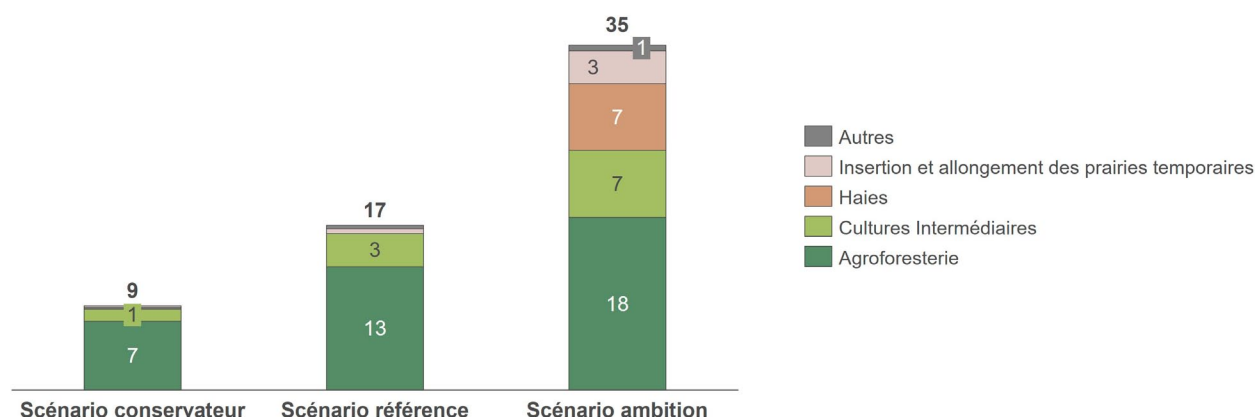


Figure 55 – Potentiel d'élimination de CO₂ des pratiques stockantes selon les scénarios, en 2050 et en MtCO_{2eq}/an

Dans le scénario de référence, les hypothèses principales sont :

- La mise en œuvre d'un marché de crédits carbone en 2050 avec une rémunération pour la tonne de CO₂ éliminée de 40 €/tCO_{2eq} en 2050
- La mise en œuvre des pratiques stockantes par 50% des agriculteurs français en 2050

Les estimations du potentiel d'élimination de CO₂ de chaque pratique stockante sont issues du rapport de l'INRAE « Stocker du carbone dans les sols français » (2020). Selon ce rapport, trois grands facteurs limitants existent : économique, réglementaire et adhésion publique.

Pour le facteur économique, ils correspondent à :

- Coût de mise en œuvre des pratiques stockantes (nouveaux outils, semences plus chères, baisse des rendements, etc...),
- Rémunération à la tonne de CO₂ absorbée trop faible et une incertitude sur les rendements futurs.

Pour le réglementaire, les facteurs limitants seraient l'absence d'un marché de compensation du carbone et le manque de systèmes de certification des crédits carbonés. Pour l'adhésion publique, les facteurs limitants seraient essentiellement liés à la difficulté de changer les habitudes des agriculteurs.

Dans le scénario de référence, le potentiel d'élimination des pratiques stockantes est estimé à partir du merit order des pratiques stockantes de l'INRAE en supposant une rémunération de la tonne de CO₂ de 40 €/tCO_{2eq} pour les agriculteurs. Ce prix est cohérent avec les prix actuels donc raisonnable pour 2050 :

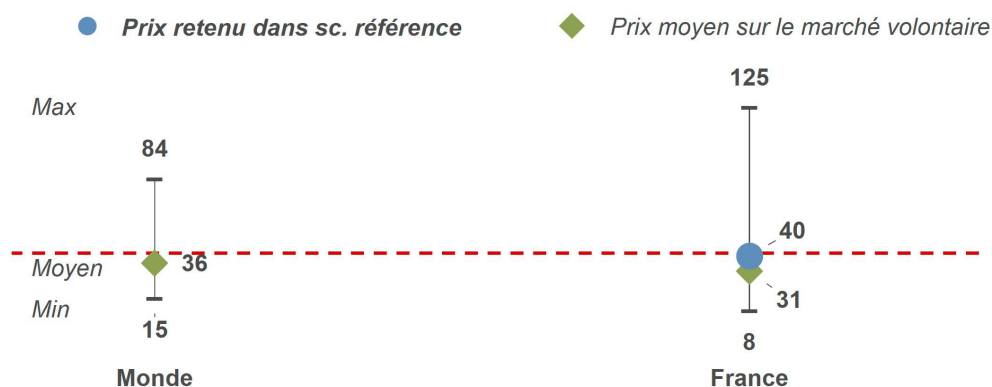


Figure 56 – Prix de la tonne de CO₂ (€/tCO_{2eq}) sur le marché volontaire de compensation carbone en France et dans le monde

Selon le merit order de l'INRAE, le potentiel d'élimination des pratiques stockantes varierait de 12 à 51 MtCO_{2eq}/an pour un prix variant de 20 €/tCO_{2eq} à 140 €/tCO_{2eq}. Celui-ci a été ajusté pour prendre en comptes les évolutions des surfaces de cultures, de prairies et de vignes vus par le scénario S3 de l'ADEME entre 2050 et 2020.

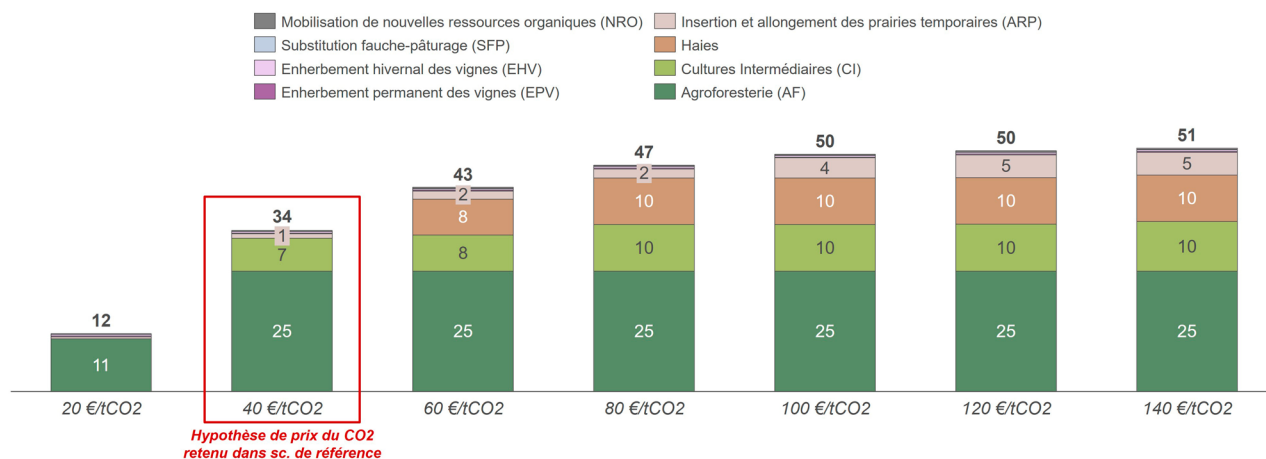


Figure 57 – Potentiel d'élimination de CO_{2eq} des pratiques stockantes selon la rémunération des acteurs en tonnes de CO₂ absorbée, en MtCO_{2eq}/an, selon le merit order de l'INRAE et ajusté avec l'évolution des superficies de cultures, prairies et vignes vus par le scénario S3 de l'ADEME

Le potentiel d'élimination du CO₂ hors contrainte de l'adhésion publique et de réglementation serait de 34 MtCO_{2eq}/an (prix de 40 €/tCO_{2eq}). Les limites sont que l'évaluation des coûts de mise en œuvre des pratiques selon l'INRAE ont été calculés sur la base de rendements, charges et prix moyens sur la période de référence 2009-2013 mais pourraient évoluer à l'avenir. Inversement, il existe de nombreux co-bénéfices non financiers à l'adoption de ces pratiques (gestion de l'eau, biodiversité, etc...) qui ne sont pas prises en compte dans le merit order de l'INRAE.

Dans le scénario de référence, un marché français ou européen des crédits carbone est supposé exister avec des capacités de certification suffisantes. En appliquant taux d'adoption des pratiques conservateur de 50% des agriculteurs, le potentiel d'élimination de CO₂ atteint 17 MtCO_{2eq}/an dans le scénario de référence.

Dans le scénario conservateur, le marché de compensation du carbone peine à décoller, avec une rémunération de seulement 30 €/tCO_{2eq} et seuls 30% des agriculteurs mettant en œuvre les pratiques stockantes, ce qui donne un potentiel de 9 MtCO_{2eq}/an.

Dans le scénario ambition, un marché efficace de compensation du carbone est supposé émerger à horizon 2050, avec une rémunération de 120 €/tCO_{2eq} et 70% des agriculteurs mettant en œuvre des pratiques stockantes, ce qui donne un potentiel de 35 MtCO_{2eq}/an.

8.3.4. Afforestation/reforestation

L'afforestation et la reforestation permettraient d'absorber 4,5 MtCO_{2eq}/an dans le scénario de référence, 3 MtCO_{2eq}/an dans le scénario conservateur et 10,1 MtCO_{2eq}/an dans le scénario ambition.

Les superficies de forêts augmenteraient de 0,9 Mha entre aujourd'hui et 2050 dans le scénario de référence, de 0,6 Mha dans le scénario conservateur et de 2,0 Mha dans le scénario ambition.

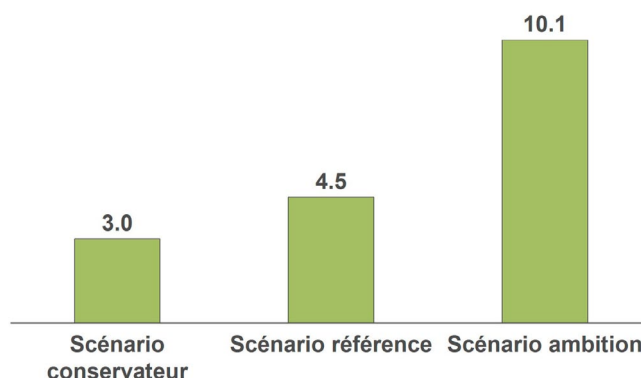


Figure 58 – Potentiel d'élimination de CO_{2eq} de l'afforestation selon les scénarios, en 2050 en MtCO_{2eq}/an

Dans le scénario de référence, les hypothèses principales sont :

- **L'augmentation des superficies de forêts entre 2023 et 2050 est de 0,9 Mha.** Ce chiffre correspond à la fois à l'objectif du SGPE de 2035 qui serait retardé à l'horizon 2050 et à la surface additionnelle entre 2023 et 2050 sur le rythme tendanciel actuel (+0,3 Mha entre 2010 et 2020) toujours selon le SGPE
- **Toute l'augmentation des superficies forestières est supposée être assurée par de l'afforestation**, et non de la reforestation

L'augmentation des superficies de forêts entre 2023 et 2050 de 0,9 Mha a été sélectionnée dans le scénario de référence parmi plusieurs valeurs disponibles dans la littérature, en particulier dans le rapport de l'ADEME « Transitions 2050 » (scénarios S1, S2, S3 et S4), le SGPE et des estimations en tendanciel.

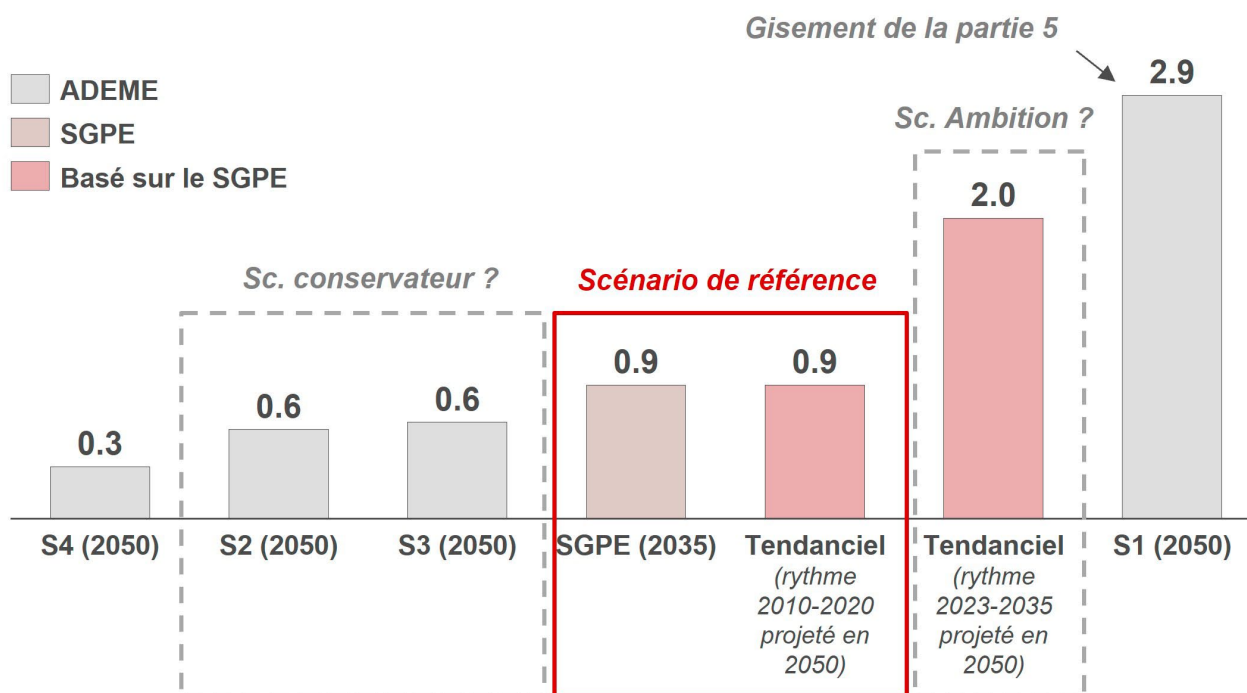


Figure 59 – Evolution des superficies forestières entre aujourd'hui et 2050 selon l'ADEME, le SGPE et des projections tendancielles, en Mha par rapport à 2023

La valeur d'augmentation des superficies forestières de +0,9 Mha a été retenue dans le scénario de référence car elle représente l'atteinte de l'objectif du SGPE avec 15 ans de retard et également à la projection du rythme actuel d'augmentation des surfaces de forêts.

Dans le scénario conservateur, la valeur d'augmentation des superficies forestières entre aujourd'hui et 2050 est de 0,6 Mha. Elle correspond à la valeur vue par les scénarios S2 et S3 de l'ADEME.

Dans le scénario ambition, la valeur d'augmentation des superficies forestières entre 2050 et aujourd'hui sélectionnée est de 2,0 Mha. Elle correspond à la projection jusqu'en 2050 du rythme 2023 – 2035 qui se réaliserait si l'objectif du SGPE de + 0,9 Mha est atteint entre 2023 et 2035.

8.3.5. Puits forestiers (hors EDC) et pratiques stockantes pour la forêt

Dans le scénario de référence et conservateur, les pratiques stockantes forestières ne permettraient pas d'augmenter le potentiel d'émissions négatives de CO₂ des forêts par rapport à aujourd'hui. En revanche, elles permettraient d'éviter une trop grande dégradation du puits de carbone forestier actuel. Celui-ci est ainsi supposé être de 18 MtCO_{2eq}/an en 2050 selon la SNBC 2, contre 28 MtCO_{2eq}/an en 2021. Il désigne la croissance des forêts actuelles (hors afforestation ou reforestation) séquestrant annuellement de plus en plus de carbone dans le sol et la biomasse aérienne. Sans action de l'homme, il ne s'agit pas d'EDC.

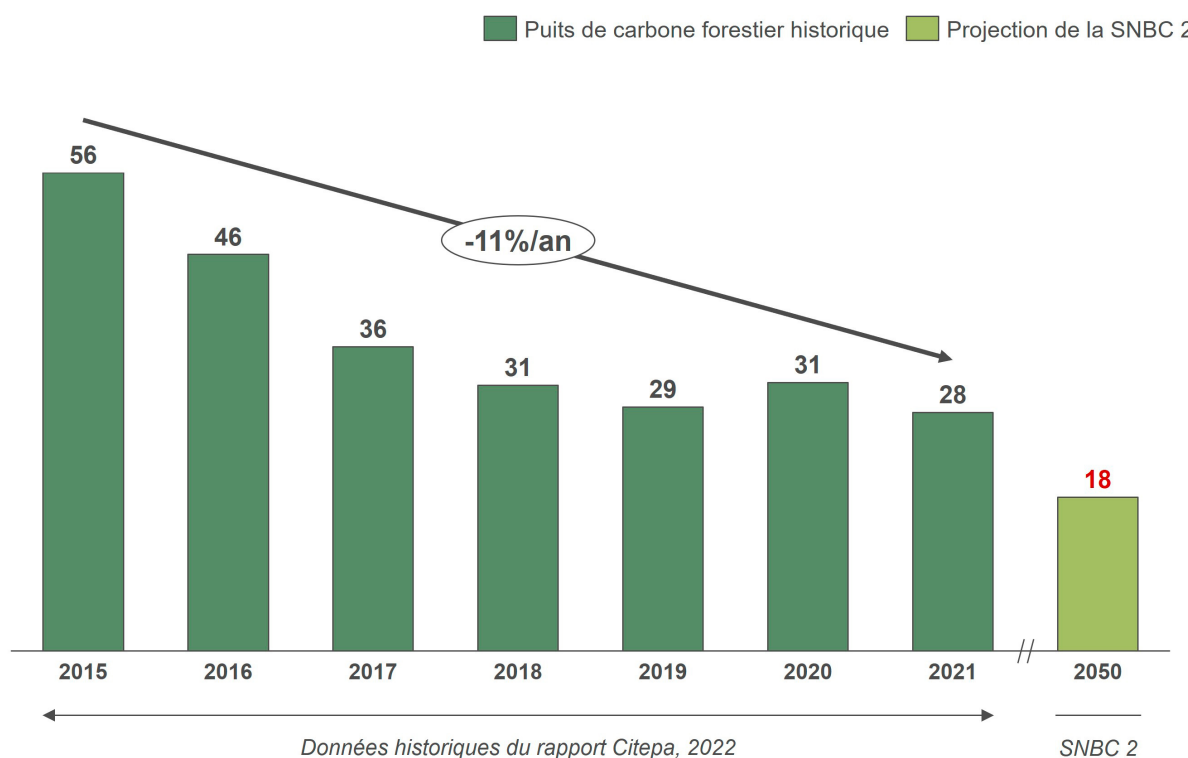


Figure 60 – Evolution du puits de carbone forestier des forêts restant forêts, en MtCO₂/an entre 2015 et 2050

En effet, les pratiques stockantes forestières permettraient certes d'éviter que le puits de carbone forestier ne se dégrade trop, mais il est peu probable que ces mêmes pratiques permettent à la forêt d'absorber davantage qu'aujourd'hui compte tenu du changement climatique et la tendance actuelle à la baisse du puits de carbone forestier.

Selon le SGPE dans le document « La planification écologique pour la forêt » (juillet 2023), le puits forestier a déjà diminué de moitié entre 2010 et 2020 (62 MtCO_{2eq}/an à 31 MtCO_{2eq}/an) sous l'effet d'une baisse de la croissance biologique, en particulier sur les surfaces d'accrus (buissons à la lisière des forêts devenant progressivement forêts), et d'un doublement de la mortalité des arbres (crise des scolytes depuis 2018) et de l'intensification des sécheresses (74). Cette baisse pourrait se poursuivre à cause du changement climatique.

Or les pratiques stockantes ont un potentiel limité puisque selon le rapport « *Stocker du carbone dans les sols français* » (2020) de l'INRAE, « *très peu de leviers de gestion sylvicoles sont mobilisables pour accroître le stock de COS [carbone organique des sols] des sols forestiers* ». Ainsi, « *L'enjeu principal est la préservation de ce stock [de carbone] et de son évolution tendancielle positive par des pratiques de gestion sylvicoles durables* ».

Dans le scénario ambition, le puits forestiers (hors EDC) est 50% plus élevé que le scénario de référence, soit 28 MtCO_{2eq}/an en 2050.

8.3.6. Biochar

Dans le scénario de référence, le volume de biomasse disponible pour le biochar est de 0,8 Mt/an, ce qui permet d'absorber environ 0,5 MtCO₂/an en 2050. Ce volume de biomasse correspond à la moitié du gisement théorique maximal estimé dans la partie 4 du rapport à 1,6 Mt/an.

Plusieurs facteurs limitants l'utilisation du gisement maximal théoriques sont identifiés :

- **Technique** : Il existe différents types de biochars de plus ou moins bonne qualité, dont les effets sur les cultures ne sont pas bien connus de tous mêmes s'ils ont fait l'objet de recherche avancées pour évaluer l'impact. Ce manque de connaissance auprès de certains agriculteurs peut ainsi limiter son essor. Des labels comme l'EBC existent pour garantir la qualité des biochars
- **Adhésion publique** : En lien avec la contrainte technique, si les agriculteurs n'ont pas l'assurance d'une augmentation des rendements agricoles et a minima la certitude que l'épandage de biochar n'engendre aucune externalité négative, ils seront réticents à utiliser du biochar dans leurs champs. Pour autant, selon les producteurs de biochar, les retours du terrain des agriculteurs ayant adopté de telles pratiques sont positifs
- **Economique** : Le coût d'utilisation du biochar comme amendement agricole n'est pas pris en compte dans l'évaluation du gisement plausible. Le biochar a en effet besoin d'un traitement d'épuration avant sa dispersion dans les champs, nécessitant une tonne de CO₂ à 200\$, pour être rentable, selon les acteurs du biochar interrogés. La vente de crédits carbone permet de compenser en partie.

A partir de ces facteurs limitants, une hypothèse de 50% du gisement maximal théorique de biochar a été prise pour le scénario de référence, ce qui représente 0,8 Mt/an.

Dans les scénarios ambition et conservateur, 100% et 10% du gisement maximal théorique de biochar ont été considérés disponibles respectivement, ce qui représente 1,6 Mt/an et 0,2 Mt/an respectivement.

8.3.7. Produits biosourcés

Dans le scénario de référence, le potentiel de produits biosourcés est évalué à 3,5 MtCO_{2eq}/an, issu du scénario S3 de l'ADEME.

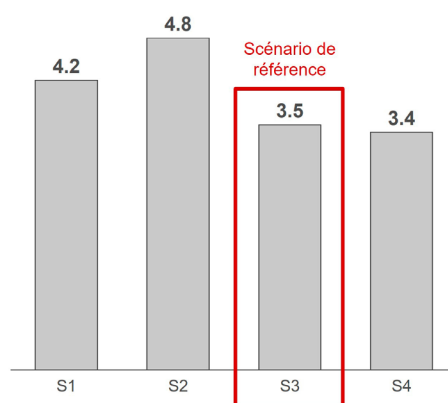


Figure 61 – Potentiel d'EDC des produits bois des scénarios ADEME en 2050 [MtCO₂/an]

Pour estimer le potentiel d'élimination des produits biosourcés dans le scénario de référence, le rapport Transitions 2050 de l'ADEME a été utilisé. Par souci de cohérence avec la partie BECSC où les valeurs du scénario S3 ont été utilisées, le potentiel d'élimination de CO₂ des produits bois de ce scénario a été utilisé pour estimer le potentiel des produits biosourcés dans le scénario de référence, soit ~3,5 MtCO₂/an en 2050.

Pour le scénario ambition, le potentiel d'élimination des produits biosourcés retenu est d'environ 4 MtCO₂/an. Il correspond à une valeur intermédiaire entre les scénarios S2 et S3.

Pour le scénario conservateur, le potentiel d'élimination des produits biosourcés retenu est d'environ 3 MtCO₂/an. Il s'agit d'une valeur plus conservatrice que les scénarios S3 et S4 de l'ADEME qui pourrait s'expliquer par un mauvais développement de la filière bois, une consommation plus forte de bois pour la production de biocarburants ou encore de fortes exportations de bois à l'étranger.

8.3.8. Tourbières

Dans les trois scénarios de référence, ambition et conservateur, le potentiel d'EDC des tourbières en 2050 est considéré comme nul quel que soit le scénario considéré.

En effet, compte tenu de la forte pression humaine sur les tourbières françaises et de la dégradation de ces dernières, il est plus raisonnable d'essayer de maintenir en état un tel écosystème et de préserver l'existant avant d'envisager une éventuelle reconstruction qui pourrait conduire à de l'EDC.

8.3.9. Carbone bleu

Dans les trois scénarios de référence, ambition et conservateur, la surface d'herbiers marins et de mangroves à reboiser est considérée comme nulle en 2050. Le potentiel d'EDC du carbone bleu est donc nul en 2050.

Que ce soit pour les herbiers marins ou les mangroves, malgré l'existence d'un gisement théorique qui pourrait laisser envisager la possibilité de stocker plus de CO₂ de façon durable, l'état actuel et la dégradation de ces écosystèmes ne laissent pas entrevoir de capacité de stockage additionnelles. Selon des études scientifiques, le réchauffement climatique pourrait même causer l'extinction de l'intégralité des herbiers de Posidonie de méditerranée, sous les scénarios RCP 6 et RCP 8.5 (31).

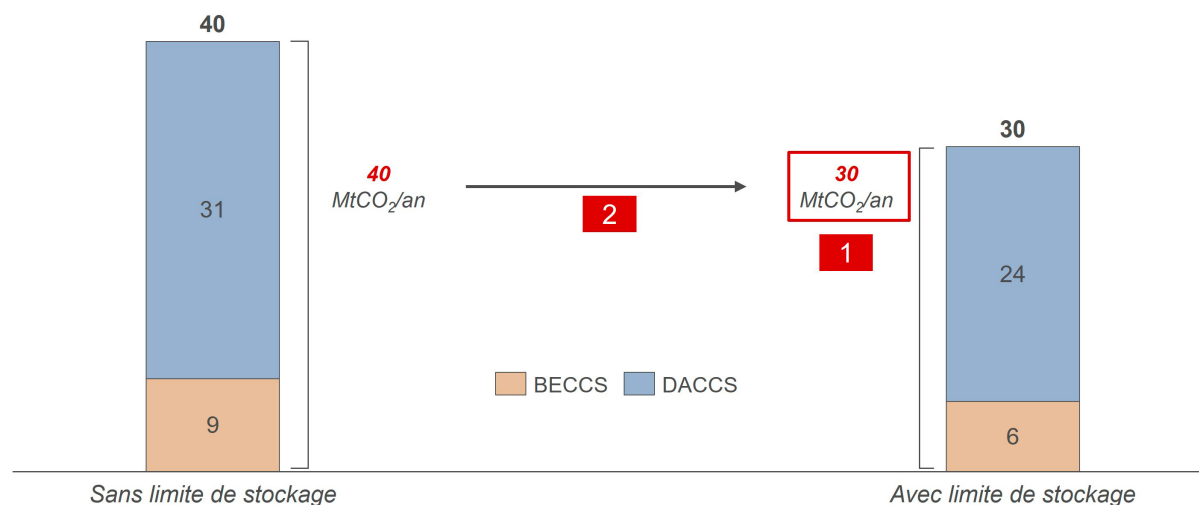
Il paraît donc plus raisonnable d'envisager une préservation des surfaces actuelles de ces écosystèmes marins qu'il faut avant tout protéger pour éviter qu'ils ne libèrent le CO₂ qui est actuellement stocké et également pour protéger la biodiversité très riche qu'ils renferment.

8.3.10. Prise en compte des limites de stockage géologique

Le stockage géologique de CO₂ et les infrastructures de transport associées pourraient être un facteur limitant pour les solutions BECSC et DACCS. La capacité de stockage géologique pour la DACCS et la BECSC est de 30 MtCO₂/an dans le scénario de référence et de 63 MtCO₂/an dans le scénario ambition. Aucun BECSC et DACCS n'est envisagé dans le scénario conservateur, car toutes les capacités de stockage sont utilisées pour de la CSC.

Dans le scénario de référence, la capacité totale de stockage est supposée être de 40 MtCO₂/an dont 25 MtCO₂/an de stockage en France (Onshore et Offshore), ce qui est cohérent avec la consultation CCUS qui anticipe entre 15 et 30 MtCO₂/an de stockage en France. Le reste des capacités de stockage (15 MtCO₂/an) se situe à l'étranger (à l'export). Cette capacité totale est partagée entre 10 MtCO₂/an de CSC pour l'industrie et 30 MtCO₂/an de DACCS et de BECSC. La prise en compte de cette contrainte diminue le potentiel d'élimination de la BECSC et de la DACCS de 40 à 30 MtCO₂/an.

Pour précision, ces 10 MtCO₂/an de CSC du scénario de référence incluent l'équipement de CSC de la moitié des usines de production de chaux épandue dans les champs afin de faire de l'EDC et d'amender les sols.



- 1** Dans le scénario de référence, environ 30 MtCO₂/an de stockage géologique de CO₂ pourrait être disponible pour le BECCS et le DACCS
- 2** Les potentiels d'absorption du BECCS et du DACCS sont réduits au prorata de leur potentiel respectif, afin de passer d'un total de 40 MtCO₂/an à un total de 30 MtCO₂/an. Le BECCS et le DACCS sont ainsi réduits de 3 et 7 MtCO₂/an resp. Cette réduction des DACCS implique une diminution de la consommation d'électricité de ~5 TWh

Figure 62 – Prise en compte de la contrainte de stockage géologique de CO₂ sur le potentiel d'élimination de CO₂ du BECCS et du DACCS dans le scénario de référence, en MtCO₂/an en 2050

Ces hypothèses proviennent de la consultation CCUS (juin 2023) qui prévoit des capacités de stockage de CO₂ en France (onshore et offshore) de 15 à 30 MtCO₂/an en 2050 soit 25 MtCO₂/an dans le scénario de référence. Par ailleurs, plusieurs projets sont actuellement en discussion pour réaliser de l'export de CO₂ vers des réservoirs en Norvège (Northern Lights), au Pays-Bas (Ararnis) et en Italie (Callisto). D'autres projets pourraient également voir le jour d'ici 2050. Les volumes d'export de CO₂ sont supposés être de 15 MtCO₂/an pour la France, soit une capacité totale de stockage de 40 MtCO₂/an attribuable à la France.

Par ailleurs, la quantité de CSC est estimée à ~10Mt (intermédiaire entre la vision de la concertation CCUS 15-20 Mt et celle de la SNBC-2 qui vise 5 Mt) et cohérente avec le scénario S3 de l'ADEME. Dans le scénario de référence, le volume de stockage géologique de CO₂ restant pour la BECCS et la DACCS est donc de 30 MtCO₂/an.

Cette contrainte de 30 MtCO₂/an de stockage géologique pour le BECCS et le DACCS réduit leur potentiel de 40 MtCO₂/an (hors contrainte) à 30 MtCO₂/an.

Dans le scénario ambition, les capacités de stockage de CO₂ en France (onshore et offshore) sont estimées à 43 MtCO₂/an en 2050 en considérant une adhésion publique du stockage de CO₂ plus forte que dans le scénario de référence. Cette valeur provient du document de l'ADEME « Avis de l'ADEME – Captage et stockage géologique de CO₂ (CSC) en France » (2020). En supposant le double des capacités d'export par rapport au scénario de référence (30 MtCO₂/an), la capacité totale de stockage de CO₂ serait de 73 MtCO₂/an en 2050. En considérant autant de CSC que le scénario de référence (10 MtCO₂/an en 2050), le volume de stockage disponible pour la BECCS et la DACCS serait de 63 MtCO₂/an en 2050.

Dans le scénario conservateur, toutes les capacités de stockage géologique envisagées sont fléchées pour le stockage des émissions fossiles. Par conséquent, il ne peut y avoir de DACCS ou de BECCS dans le scénario conservateur.

8.4. Estimation du coût pour la mise en œuvre des scénarios envisagés

Il est possible d'estimer les coûts associés à la mise en œuvre des différents scénarios à partir des estimations données par le rapport « Climate Change 2022, Mitigation of climate change » du GIEC (IPCC 2022). Le coût d'abattement à maturité des principales méthodes d'EDC serait compris entre 0 à 400 USD/tCO₂ (valeur moyenne considérée), et sont détaillés dans la Figure 28.

Comme illustré en Figure 63, au niveau français, le coût annuel de mise en œuvre des méthodes d'EDC est compris entre 1,3 et 19,4 Mds d'euros si toutes les méthodes ont atteint leur maturité. Pour atteindre la neutralité carbone, objectif visé dans le scénario de référence, un coût annuel de 8,3 Mds d'euros doit être engagé pour exploiter les ressources mises à disposition pour chaque méthode retenue. Le partage de ces coûts entre les pouvoirs publics et les acteurs privés sera fonction des règles mises en place. Les coûts de capture et de stockage du CO₂ selon les différentes méthodes considérées sont indiqués en annexe 10.II.

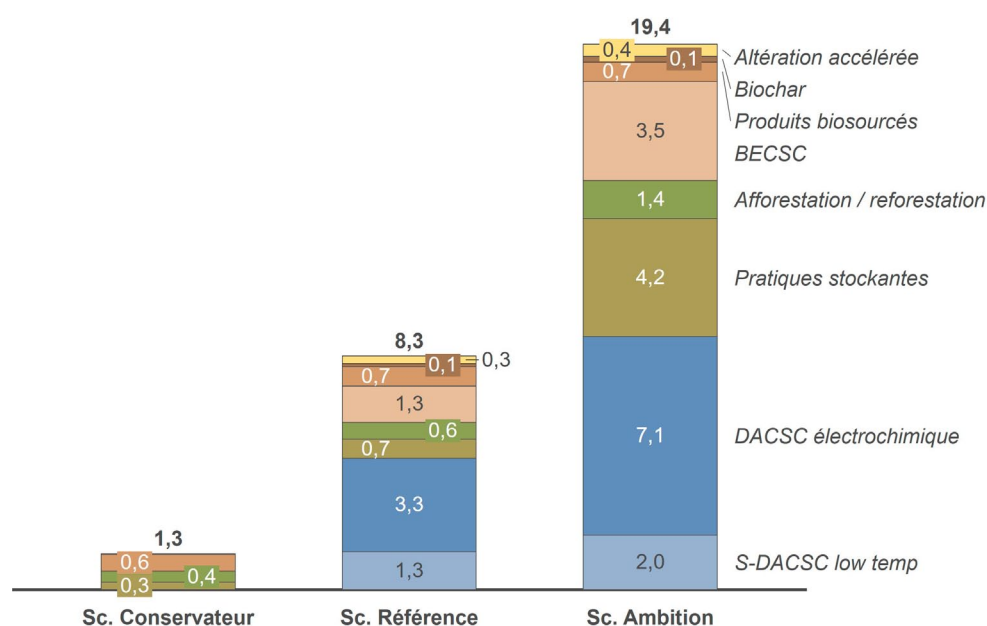


Figure 63 - Coûts annuels pour mettre en œuvre les méthodes d'EDC retenues selon le scénario considéré (en Milliards d'euros)

Il est important de noter que ce chiffrage ne couvre que les coûts d'achats des tonnes éliminées nécessaires pour atteindre l'objectif, mais ne couvre pas les coûts de soutien au développement des filières en recherche, innovation et déploiement.

8.5. Potentiel d'EDC en 2030

Dans le scénario de **référence**, les puits de carbones naturels et les méthodes d'EDC cumulent **32 MtCO_{2eq}/an** de puits de carbone en 2030.

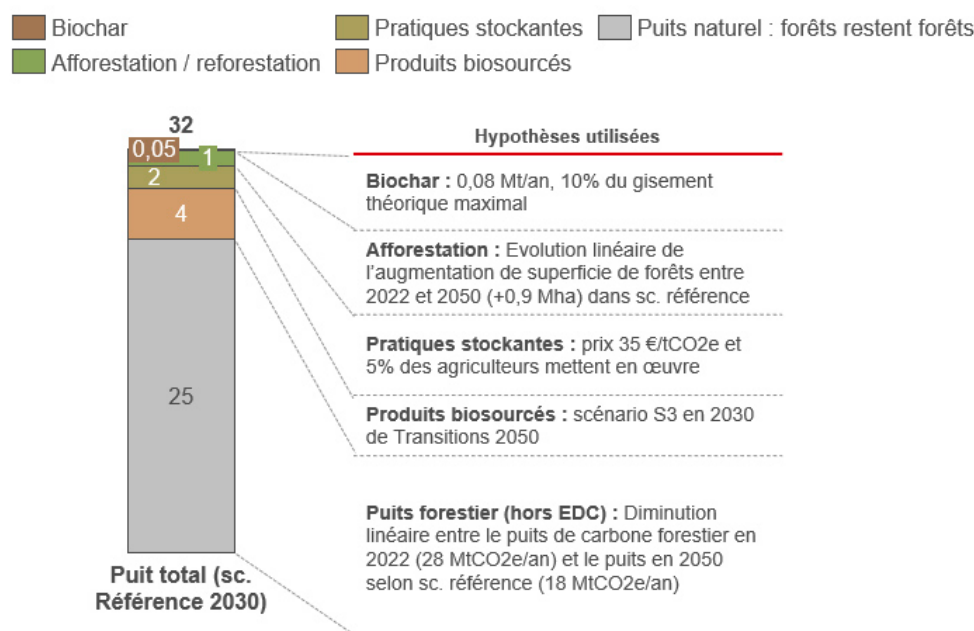


Figure 64 – Potentiel d'élimination de CO₂ des solutions d'EDC et du puits de carbone forestier (hors EDC) dans le scénario de référence en 2030 (en Mt/an)

Dans le scénario de référence, aucun volume d'électricité n'est supposé disponible pour l'EDC car l'équilibre offre – demande en 2030 est déjà jugé difficile par RTE à cause notamment de l'électrification rapide et conséquente des usages : industrie et mobilité électrique principalement. En conséquence, il n'y a pas de DACCS en 2030 en France.

Par ailleurs, aucune capacité de stockage géologique de CO₂ n'est supposée disponible en 2030 pour l'EDC car les premières capacités de stockage seraient en priorité utilisées pour décarboner l'industrie lourde (e.g. sidérurgie à Dunkerque) et les cimenteries grâce à de la CSC. En conséquence, il n'y a pas de BECSC en 2030 en France.

Néanmoins, le biochar commence à être déployé et la France commence à planter des arbres pour accroître ses superficies forestières afin d'atteindre l'objectif de + 0,9 Mha de forêts en 2050. A ce titre, une évolution linéaire de l'augmentation des superficies forestières est supposée entre aujourd'hui et 2050.

En 2030, les pratiques stockantes commencent également à être mises en œuvre grâce au Label Bas Carbone. Une rémunération de 35 €/tCO_{2eq} est supposée, ce qui est légèrement supérieur à la moyenne actuelle sur le Label Bas Carbone (32 €/tCO_{2eq}). Même si la rémunération commence à être attractive, seuls 5% des agriculteurs commencent à changer leurs habitudes pour mettre en œuvre les pratiques stockantes.

Concernant les produits biosourcés, l'exploitation de la forêt permet de réaliser davantage de bâtiments en bois en 2030 ce qui permet de stocker davantage de carbone.

Enfin, le puits forestier se dégrade progressivement à cause des conséquences croissantes du changement climatique. Ce puits est supposé décroître linéairement entre aujourd'hui (28 MtCO_{2eq}/an) et sa valeur en 2050 selon le scénario de référence (18 MtCO_{2eq}/an).

Le Tableau 13 résume les différentes hypothèses prises pour chaque gisement de ressources nécessaires aux différentes méthodes d'EDC. En rouge, sont représentées les méthodes présentant un potentiel non nul en 2030, avec la reforestation, les produits biosourcés, le biochar, les pratiques stockantes agricoles, ainsi que le puits de carbone naturel forestier. Le gisement d'électricité renouvelable ou bas carbone disponible pour de l'EDC est considéré nul en 2030, tout comme la capacité de stockage géologique excluant ainsi le BECSC et le DACCS.

Ressource	Méthode d'EDC	Utilisation des ressources (2030)	Potentiel d'absorption (MtCO ₂ eq/an)	Justification / hypothèse
Electricité	OAE électrochimique	0 TWh _a	0	Pas d'électricité renouvelable additionnelle
	DACCS électrochimique	0 TWh _a	0	Pas d'électricité renouvelable additionnelle
	S-DACCS (low-temp)	0 TWh _a	0	Pas d'électricité renouvelable additionnelle
	Alcalinisation minérale des océans	0 TWh _a	0	Pas d'électricité renouvelable additionnelle
Chaleur	S-DACCS (low-temp)	0 TWh _{th}	0	Pas de stockage géologique de CO ₂ non fossile
	Alcalinisation minérale des océans	0 TWh _{th}	0	Pas de roches disponibles
	Reforestation / Afforestation	+0,3Mha	1,3	Evolution linéaire 2022 – 2050
Surfaces de nouvelles terres (forêts, tourbières, herbiers, mangroves)	Augmentation superficies tourbières	+ 0 Mha	0	Difficultés à les préserver aujourd'hui → maintien des superficies actuelles
	Augmentation superficies herbiers et mangroves	+ 0 Mha	0	Difficultés à les préserver aujourd'hui → maintien des superficies actuelles
Surfaces pratiques stockantes	Pratiques stockantes	Selon les pratiques	1,8	Prix 35 €/tCO₂e et 5% des agriculteurs mettent en œuvre car dynamique en cours
Biomasse	BECCS	0 TWh _{th}	0	Pas de stockage géologique de CO ₂ non fossile
	Produits biosourcés	2,3 Mt	4,1	ADEME S3 en 2030
	Biochar	0,08 Mt	0,05	Facile à faire, 10% du gisement maximal
Roches et minéraux	Altération accélérée	0 Mt	0	Pas d'augmentation production de calcaire, production CKD sans CCS
	Alcalinisation minérale des océans			
Surfaces de forêts	Puits de carbone naturel forestier	~18 Mha	~25	Evolution linéaire 2022 - 2050

Tableau 13 – Synthèse des potentiels d'élimination de CO₂ de chaque méthode d'EDC à horizon 2030



9. Conclusion

Développer et diversifier les capacités d'élimination du dioxyde de carbone est désormais indispensable pour atteindre nos objectifs climatiques. En France, cet impératif est d'autant plus immédiat que le puits naturel forestier, sur lequel le pays a beaucoup misé jusqu'ici pour compenser les émissions résiduelles, montre des signes de faiblesse, en partie dus au changement climatique (75).

Mais l'information nécessaire à la planification du déploiement organisé d'un portefeuille diversifié de méthodes d'EDC manque. La plupart des pays ne connaissent pas leurs capacités à déployer de l'EDC et peinent donc à définir une stratégie.

Ce rapport a permis d'explorer ce potentiel en France, en étudiant les différentes méthodes d'Élimination du Dioxyde de Carbone (EDC) qui pourraient permettre à la France d'atteindre la neutralité carbone voire de la dépasser. Le déploiement de l'EDC n'est pas seulement une question technique. Elle s'inscrit dans une dynamique sociétale et dépend de la participation des parties prenantes et des populations. Pour prendre en compte cette réalité et maximiser la valeur des résultats de l'étude pour la prise de décision, la méthodologie employée a notamment mis l'accent sur (1) la prise en compte de toutes les méthodes d'EDC disponibles et leur articulation, (2) une analyse du potentiel qui part des ressources disponibles (bottom-up) et de leur disponibilité réelle, et enfin (3) une prise en compte de la « géographie sociale » française sur l'EDC.

Diversité de méthodes

Parmi toutes les méthodes d'EDC existantes ou proposées, le choix a été de retenir toutes celles qui sont en capacités de se développer à l'échelle d'ici à 2050. Certaines, comme la DACCS électrochimique ou l'altération accélérée des roches sont encore classées à des TRL bas dans la littérature, mais sont déjà en cours de déploiement et/ou font même déjà l'objet de contrats importants. D'autres en revanche, comme la fertilisation des océans au fer ont été invalidées et ont été écartées. Les méthodes pour lesquelles il n'existe pas encore de démonstrateur, et/ou que la question des impacts sur les systèmes ouverts n'est pas élucidée ont également été écartées. À l'arrivée, le portefeuille de méthodes mobilisées dans les scénarios de déploiement couvre tout de même les quatre grandes familles de méthodes d'EDC : (i) la conversion de la biomasse, (ii) la gestion améliorée des écosystèmes, (iii) les méthodes électrochimiques et (iv) les méthodes géochimiques.

Dans les scénarios de déploiement proposés, il est intéressant de noter qu'aucune méthode ne se distingue significativement en termes de volumes. Les quatre familles de méthodes sont mobilisées dans des proportions très similaires. On le voit également en comparant le scénario de référence avec le scénario ambition. L'augmentation de capacité est bien rendue possible par une contribution distribuée. Il n'y a donc pas, pour la France, de méthode « phare » dont tout dépendrait, mais bien la possibilité de jouer sur toute la diversité de méthodes et adopter une approche « portefeuille ».

Analyse « bottom-up »

L'analyse de la disponibilité des différentes ressources nécessaires pour l'EDC est très informative. En France, il existe peu de ressources inutilisées. Déployer l'EDC à l'échelle suppose donc de dégager de nouveaux volumes de ressources afin de ne pas entrer en compétition avec les usages actuels. La sobriété est la première piste pour libérer des volumes sur toutes les ressources. Mais au-delà, il est nécessaire d'évaluer dans quelle mesure un gisement peut être développé. Ainsi, la France a un potentiel important de production supplémentaire d'énergie décarbonée, mais les perspectives pour augmenter la production de biomasse sont limitées. Pour le stockage géologique du CO₂, la France dispose d'un potentiel théorique élevé, mais les délais pour développer les réservoirs identifiés deviennent progressivement le goulot d'étranglement.

Les scénarios référence et ambition reposent donc sur la **mise en œuvre de politiques volontaristes, non seulement pour créer le cadre et les soutiens nécessaires aux filières d'EDC, mais aussi dans toutes les filières connexes qui produisent les ressources nécessaires à l'EDC**. Le scénario conservateur, lui, représente justement la situation inverse, le statu quo, où ces changements n'auraient pas lieu, ou alors trop tard.

La construction des scénarios s'est effectuée en deux temps. Le potentiel théorique représente les capacités atteignables si l'ensemble de ressources disponibles étaient utilisées en priorité pour de l'EDC. Il représente des conditions abstraites, comme par exemple si un « effort de guerre » était engagé pour stabiliser au plus vite le climat. Les trois scénarios finaux se basent eux sur le potentiel réalisable dans des conditions proches de l'actuel. **Plus d'un ordre de grandeur sépare le potentiel théorique du potentiel réalisable, reflet des hypothèses beaucoup plus prudentes ou proches de l'actuel qui sous-tendent les scénarios finaux.**

Il est également important de garder à l'esprit que ceux-ci comportent **des marges d'erreur dans les deux sens**. Le déploiement de certaines méthodes pourrait rencontrer des obstacles qui retardent ou empêchent l'atteinte des objectifs. Mais d'autres méthodes, comme l'alcalinisation des océans pourraient accélérer leur maturation et entrer en jeu plus tôt que prévu. Il est également possible que de nouvelles sources d'énergie deviennent opérationnelles, comme l'énergie marémotrice ou osmotique pour les renouvelables, ou les SMR pour la filière nucléaire.

Géographie sociale

Les entretiens ciblés auprès des parties prenantes, et le panel citoyen ont largement confirmé des tendances connues dans la société française vis-à-vis de l'EDC.

D'abord, un manque d'information et une connaissance partielle du sujet. Très peu de contenus sont disponibles en français pour expliquer les tenants et aboutissants de l'EDC.

Une préférence claire pour les solutions basées sur la nature, ensuite, perçues comme plus sûres, et ayant plus de co-bénéfices. Pour les autres méthodes, des craintes existent quant à leurs efficacités réelles, et leur innocuité, notamment pour celles qui jouent sur les systèmes ouverts comme les océans. Un consensus émerge quant à la nécessité de s'intéresser à ces méthodes, et de faire de la recherche pour les optimiser et étudier leurs impacts, mais leur déploiement pose problème. Ces positions sont très alignées avec la couverture médiatique majoritaire de l'EDC, qui fait souvent des amalgames entre l'EDC et d'autres méthodes comme la CSC, la CCU ou même la gestion de la radiation solaire, sous le terme polémique de géo ingénierie.

Enfin, on identifie clairement un besoin de participation, de contrôle, qui s'exprime notamment par le rejet des projets décidés de façon centrale, et imposés aux populations locales.

Messages clefs

Cette étude a permis de montrer que, sans modifier significativement les conditions actuelles ni remettre en question les usages actuels des ressources, **la France peut sécuriser l'atteinte de son objectif de neutralité carbone d'ici 2050** en se dotant de politiques volontaristes de développement de l'EDC. Elle pourrait même **devenir nette négative avant 2050** si elle tenait sa trajectoire de décarbonation, et se donnait les moyens de réaliser le scénario ambition. La France a en effet de nombreux atouts qui lui permettent de mobiliser une large diversité de méthodes, ce qui lui permet dans les scénarios de référence et ambition de miser moins sur les puits naturels et de **respecter le principe d'équivalence entre l'origine des émissions résiduelles et le niveau de permanence des méthodes d'EDC mobilisées** pour les compenser (like for like).

Au travers de la construction puis de la comparaison des scénarios, **les capacités de stockage géologique de CO₂, la disponibilité d'énergie décarbonée supplémentaire et le niveau de rémunération des pratique stockantes** apparaissent clairement comme les principaux facteurs limitants au déploiement de l'EDC en France.

Enfin, même si l'objectif principal de cette étude était d'évaluer la faisabilité technique d'un déploiement ambitieux de l'EDC, une estimation rapide des **coûts à envisager** est donnée sur la base des données publiées par le GIEC. Cette estimation, comprise entre 8 et 19 Mds d'euros par an à l'horizon 2050, (soit environ 0.3 jusqu'à 0.7% du PIB de 2021) donne un ordre de grandeur utile pour comparer avec les autres postes de dépense du gouvernement, notamment pour la transition écologique. Deux précisions sont importantes sur ces montants. D'abord, ces coûts seront partagés entre acteurs privés et publiques, en fonction des réglementations mises en place. Ensuite, ils n'incluent pas les montants qu'il est nécessaire d'investir dans la recherche et le soutien à l'innovation pour que les méthodes d'EDC progressent et soient en capacité de répondre aux besoins.

Parce que pour l'EDC aussi, fixer des objectifs ne suffira pas à les atteindre, et devant la diversité des ressources mobilisées, il semble clair que le déploiement de l'EDC doit être accompagné par les pouvoirs publics, par exemple en construisant **une stratégie dédiée** qui permettrait d'articuler le développement des différents maillons techniques, les mécanismes d'incitation au déploiement et la réglementation. Une ébauche de feuille de route a été produite dans le cadre de ce projet, elle est publiée conjointement à ce rapport.

Dépendre d'un déploiement de l'EDC à grande échelle pour pouvoir atteindre la neutralité carbone serait un constat d'échec sur la réduction des émissions. Il faut à tout prix éviter ce scénario, et Carbon Gap a fait des propositions de mesures en ce sens dans le rapport « *How to avoid carbon removal delaying emissions reductions* ».

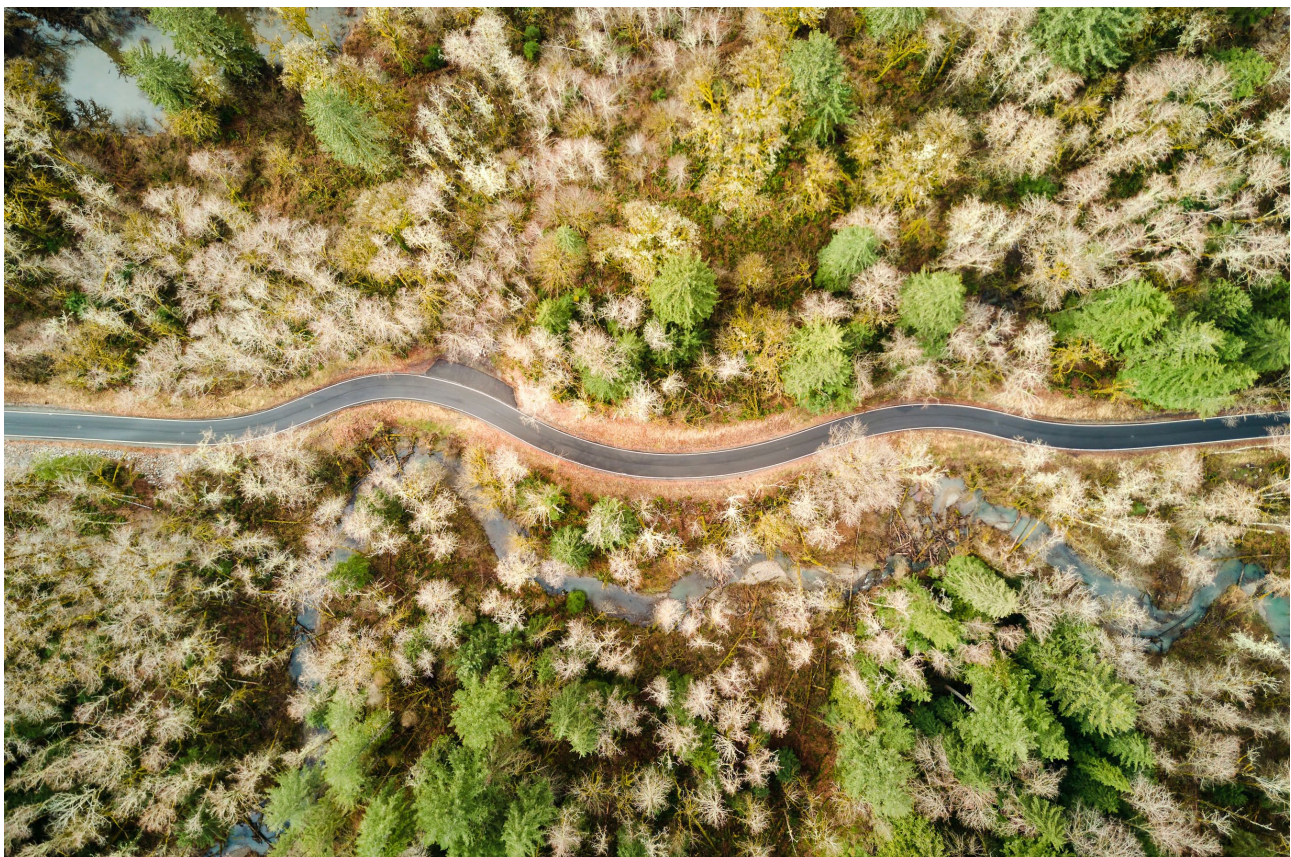
Développer l'EDC à l'échelle de façon organisée pour atteindre la neutralité carbone plus tôt et se projeter dans une phase nette négative qui permettrait de restaurer du budget carbone est, à l'inverse, un projet nécessaire et fédérateur.

Ce rapport doit servir de tremplin pour que la France se dote au plus vite d'une stratégie robuste pour le troisième pilier de l'action climatique qu'est l'EDC.

Note :

L'exercice réalisé dans ce rapport, à savoir l'estimation d'un potentiel, repose sur des hypothèses que les auteurs ont cherché à montrer de façon transparente, mais également sur des paramètres technico-économiques, comme le coût de mise en œuvre des méthodes d'EDC, leurs consommations d'énergie ou autres ressources. Ces paramètres sont appelés à évoluer rapidement, à mesure que les méthodes seront améliorées techniquement, et déployées à plus grande échelle pour faire baisser les coûts. Cependant, les améliorations devraient être incrémentielles, et ne pas changer drastiquement les résultats présentés dans ce rapport.

Il est aussi important de noter qu'un certain nombre de documents clés sont en cours de mise à jour ou de rédaction lors de l'écriture de ce rapport, notamment la version 3 de la SNBC et la publication associée de la PPE. Ces documents ne sont par conséquent pas pris en compte dans le rapport.



Disclaimer

Ce document a été élaboré pour présenter une estimation quantifiée du potentiel de la France en matière de déploiement des méthodes d'élimination du dioxyde de carbone (EDC). Étant donné que la plupart des technologies évaluées dans ce rapport en sont encore aux phases initiales de développement, l'évaluation comporte des incertitudes : certaines méthodes pourraient ne pas faire leurs preuves, alors que d'autres qui sont mises de côté ici pourraient se développer rapidement. Pour réduire ces incertitudes, il est essentiel d'accumuler plus de données notamment en construisant des démonstrateurs pour tester les méthodes en conditions réelles. Ce rapport a pour objectif d'informer les décideurs politiques et les parties prenantes impliquées dans le développement de l'EDC en France.

Carbon Gap et E-CUBE Strategy Consultants déclinent toute responsabilité quant à l'utilisation de ce rapport et de son contenu, y compris toute action ou décision prise à la suite d'une telle utilisation.

Bibliographie

1. *Sustainability limits needed for CO₂ removal*. **Alexandra Deprez, Paul Leadley, Kate Dooley, Phil Williamson, Wolfgang Cramer, Jean-Pierre Gattuso, Aleksandar Rankovic, Eliot L. Carlson, Felix Creutzig**. s.l. : Science insights, 2014.
2. *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. **GIEC, Working Group 3**. Cambridge : GIEC, 2022.
3. **François de Rochette, Eli Mitchell-Larson, Sylvain Delerce, Benjamin Tincq, Liam St Louis, Greg De Temmerman**. *Élimination du dioxyde de carbone atmosphérique: introduction aux procédés à émissions négatives*. s.l. : Carbon Gap, 2022.
4. **European Scientific Advisory Board on Climate Change**. *Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030–2050*. 2023. 978-92-9480-584-3.
5. *Reducing the risks of climate overshoot*. **Climate Overshoot Commission**. 2023.
6. *Integrated Assessment of Carbon Dioxide Removal*. **W. Rickels, F. Reith, D. Keller, A. Oeschles, and M. F. Quaas**. s.l. : Earth's Future, 2018, Vol. 6.
7. *Assessment of carbon dioxide removal potential via BECCS in a carbon-neutral Europe*. **Lorenzo Rosa, Daniel L. Sanchez and Marco Mazzotti**. s.l. : Energy & Environmental Science, 2021.
8. *Biomass residue to carbon dioxide removal: quantifying the global impact of biochar*. **David Lefebvre, Samer Fawzy, Camila A. Aquije, Ahmed I. Osman, Kathleen T. Draper and Thomas A. Trabold**. 65, s.l. : Biochar, 2023, Vol. 5.
9. **Negem, project**. *Member State specific pathway for NETP*. 2023.
10. **IRENA**. renewables readiness Assessment. [Online]
www.irena.org/Energy-Transition/Country-engagement/RRA.
11. **NASA Earth Observatory**. The carbon cycle. [Online] 2011.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/CarbonCycle>.
12. **INRAE**. *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?* 2020.
13. **ADEME**. *Engrais azotés et N₂O*.
14. **SDES**. *Bilan environnemental de la France – Edition 2022*. 2022.

15. *The influence of particle size on the potential of enhanced basalt weathering for CDR*. **Rinder Thomas, Christoph von Hagke**. 15, s.l. : Journal of Cleaner Production, 2021, Vol. 315.
16. **IEA**. *Direct Air Capture, a key technology for net zero*. 2022.
17. **Frontier**. Frontier project applications. Github. [Online]
[https://github.com/frontierclimate/carbon-removal-source-materials/tree/main/Project Applications](https://github.com/frontierclimate/carbon-removal-source-materials/tree/main/Project%20Applications).
18. **RTE**. *Futurs énergétiques 2050*. 2022.
19. **ADEME**. *Récupération de chaleur fatale, état des réalisations et évolutions du gisement à fin 2020*. 2022.
20. **ADEME**. *Transitions 2050*. 2021.
21. **Commissariat Général du Développement Durable**. *Les milieux humides et aquatiques continentaux*. 2018.
22. **Conservatoires d'espaces naturels**. *Pourquoi restaurer les tourbières ?*
23. **Observatoire du littoral**. [Online]
<https://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-r9.html>.
24. **EFSE**. *Les écosystèmes marins et côtiers*. 2018.
25. *Mangrove ecological services at the forefront of coastal change in the French overseas territories*. **Ewan Trégarot, Anne Caillaud, Cindy C. Cornet, Florent Taureau, Thibault Catry, Simon M. Cragg, Pierre Failler**. s.l. : Science of the Total Environment, 2020.
26. **ROM : Réseau d'Observation des Mangroves**. [Online] 2022.
www.pole-tropical.org/2022/07/les-mangroves-a-travers-le-temps/.
27. **IPBES**. *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. 2019.
28. **IFRECOR**. *Etat de santé des récifs coralliens, herbiers marins et mangroves des outre-mer français*. 2021.
29. **Hily C., Duchêne J., Bouchon C., Bouchon-Navaro Y., Gigou A., Payri C., Védie F.** *Les herbiers de phanerogames marines de l'outre-mer français*. s.l. : Conservatoire du littoral, 2010.
30. *Seagrass Meadows distribution and trajectories of change*. **Telesca**. 2015.
31. **EFSE**. *La séquestration de carbone par les écosystèmes en France*. 2019.
32. **BRGM**. *Mémento roches et minéraux industriels Carbonates calciques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole*. 2000.
33. **BRGM**. *Carbonates calciques et magnésiens Mémento*. 2017.
34. **BRGM**. *Mémento roches et minéraux industriels : l'olivine et la dunite*. 2000.
35. **BRGM**. *Mémento roches et minéraux industriels l'olivine*. 1988.
36. **BRGM**. *Mémento roches et minéraux industriels dolomie, magnésite et produits dérivés à usage industriel et agricole*. 1989.
37. *Silicate production and availability for mineral carbonation*. **P. Renforth, C.-L. Washbourne, J. Taylder, and D. A. C. Manning**. s.l. : Environmental Science & Technology, 2011.

38. **France Ciment.** *Le ciment en chiffres.* 2022.
39. **KHOUAN, Faiza.** *Caractérisation et utilisation de poussières de four de ciment CKD dans la stabilisation/solidification des déchets de l'unité BCR.* 2016.
40. *Valorisation des déchets de four à ciment (CKD) de la cimenterie de Ain-Al-Kebira (Algérie) dans le Mortier.* **Guettouche Amar, Abdelghani Merdas.** 2019.
41. **BRGM.** *Panorama du marché français des matériaux de carrière et produits dérivés.* 1999.
42. **BRGM.** *Mémento roches et minéraux industriels Wollastonite.* 1991.
43. **Réseau CO₂ GeoNet.** *Que signifie vraiment le stockage géologique de CO₂ ?* 2008.
44. *Carbon dioxide storage through mineral carbonation.* **Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Bergur Sigfússon, Chiara Marieni, David Goldberg, Sigurður R. Gislason & Eric H. Oelkers.** s.l. : Nature Reviews Earth Environment, 2020, Vol. 1.
45. *Annales des Mines, responsabilité et environnement.* **LAVERGNE, Dominique AUVERLOT et Richard.** Janvier 2022, Vol. 105. 1268-4783.
46. *Capture et Stockage du CO₂ : le puits de carbone géologique.* **Czernichowski-Lauriol, Isabelle.** 4-5, s.l. : Comptes rendus Géosciences, 2020, Vol. 352.
47. **Ministère de la transition écologique et solidaire.** *Stratégie nationale bas-carbone.* 2020.
48. **CATF.** *Unlocking Europe's CO₂ storage potential.* 2023.
49. **ADEME.** *Avis technique: le captage et le stockage du CO₂ (CSC) en France.* 2020.
50. **BRGM.** *Premières estimations du potentiel de stockage du CO₂ sous forme d'hydrates de gaz dans les formations sédimentaires du Golfe de Gascogne et de la Mer Celtique (offshore profond).* 2014.
51. **Ministère de la transition écologique et solidaire.** *Consultation : Stratégie CCUS Capture, stockage, et utilisation du carbone.* 2023.
52. **Terega.** *Projet PYCASSO.* [Online] https://assets.ctfassets.net/ztehsn2qe34u/7eY6OvPXsVPuF4cN07Kf35/7623a6d261947c84fa0eb780724065f8/TEREGA_plaquette_pycasso_FR.pdf.
53. **BRGM.** *Planning a Notable CCS Pilot-Scale Project: A Case Study in France, Paris Basin - Ile-de-France.* 2022.
54. **BRGM.** *Projet VASCO, Identification des sites potentiels de stockage de CO₂ et première estimations des capacités.* 2012.
55. **Club-CO₂.** [Online] www.club-co2.fr/fr/content/transporter-le-co2.
56. **Zero Emissions Platform.** *Description of the candidate projects in the thematic area of cross-border carbon dioxide transport and storage networks.* 2022.
57. **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.** *Ajustements technique des budgets carbone.* 2022.
58. **SGPE.** *La planification écologique: synthèse du plan.* 2023.
59. **European Commission.** *Why do we need carbon capture, use and storage?* 2022.

60. **Agreste.** *Statistique agricole annuelle 2021 – Chiffres définitifs.* 2022.
61. **Jean Pisani-Ferry, Selma Mahfouz.** *Les incidences économiques de l'action pour le climat.* s.l. : France Stratégie, 2023.
62. **Cour des comptes.** *Apprécier la contribution de la dépense publique à la transition écologique.* 2023.
63. **Gouvernement.** *Rapport sur l'impact environnemental du budget de l'Etat.* 2022.
64. **Institut Rousseau.** *2% pour 2°C, Les investissements publics et privés nécessaires pour atteindre la neutralité carbone de la France en 2050.* 2022.
65. **ADEME.** *Feuilleton, Les effets macroéconomiques.* 2022.
66. **SDES.** *Opinions des Français sur l'environnement en 2022.* 2023.
67. *Discourses of climate delay.* **William F. Lamb, Giulio Mattioli, Sebastian Levi, J. Timmons Roberts, Stuart Capstick, Felix Creutzig, Jan C. Minx, Finn Müller-Hansen, Trevor Culhane and Julia K. Steinberger.** s.l. : Cambridge University Press, 2020.
68. **SGPE.** *La planification écologique de l'industrie.* 2023.
69. *Le principe de précaution devant le Conseil constitutionnel.* **Denoix De Saint Marc, Renaud.** 2014.
70. **Réseau Action Climat.** *Fausse solutions – Captage et stockage du CO₂.* 2022.
71. **GreenPeace.** *Ce que GreenPeace propose.* s.l. : www.greenpeace.fr/sauver-climat-greenpeace-propose/, 2017.
72. **Confédération Paysanne.** *Méthanisation : la Confédération paysanne demande un moratoire.* s.l. : www.confederationpaysanne.fr/actu.php?id=10996, 2021.
73. **France Energie Eolienne.** *Observatoire de l'éolien 2022 – Analyse du marché, des emplois et des enjeux de l'éolien en France.* 2022.
74. **SGPE.** *La planification écologique de la forêt.* 2023.
75. *Temperature extremes of 2022 reduced carbon uptake by forests in Europe.* **Auke M. van der Woude, Wouter Peters, Emilie Joetzjer, Sébastien Lafont, Gerbrand Koren, Philippe Ciais, Michel Ramonet, Yidi Xu, Ana Bastos, Santiago Botía, Stephen Sitch, Remco de Kok, Tobias Kneuer, Dagmar Kubistin, Adrien Jacotot, Benjamin Loubet.** s.l. : Nature, 2023.
76. **Campbell et al.** *Geochemical Negative Emissions Technologies: Part I. Review.* 2022.
77. **IGN.** Communiqué de presse 12 octobre 2023. [Online] www.ign.fr/files/default/2023-10/cp_ign_memento_2023.pdf.
78. **Smith, S. M., Geden, O., Nemet, G., et al.** *The State of Carbon Dioxide Removal – 1st edition.* 2023.
79. **SHOM.** *Superficies des espaces maritimes de souveraineté et de juridiction de la France.* 2023.
80. **Telesca, Luca.** *Seagrass meadows (Posidonia oceanica) distribution and trajectories of change.* 2015.
81. **WWF.** [Online] www.wwf.fr/especes-prioritaires/posidonie.

82. **National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine.** *Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda.* 2019.
83. **IGN.** *Quel rôle pour la filière forêt bois française dans le changement climatique.* 2017.
84. **ADEME.** *Feuilleton Sols : Quels enjeux pour une gestion durable des sols à l'horizon 2050 ?* 2022.
85. **CITEPA.** *Rapport Secten Edition 2020 – Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêt.* 2022.
86. **ADEME.** *Un mix 100% renouvelable ? Analyses et optimisations.* 2015.
87. **Roustan, Michel.** *Eau : données et statistiques. s.l. : Techniques de l'Ingénieur,* 2023.
88. **CEREMA.** *La mesure de l'étalement urbain.* 2015.
89. **AGRESTE.** *L'occupation du sol entre 1982 et 2018.* 2021.
90. **(SOeS), Le service de l'observation et des statistiques.** *Atlas régional de l'occupation des sols en France.* 2016.
91. **IGN.** *Le mémento Inventaire forestier – La forêt en chiffres et en cartes – Edition 2014.* 2014.
92. **EFSE.** *Les milieux humides et aquatiques continentaux.* 2018.
93. **ONRB.** *Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en France.* 2020.
94. **AgroLeague.** *Fonctionnement, avantages et inconvénients du semis direct.* 2022.
95. **ADEME.** *Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ?* 2018.
96. **SDES.** *Bilan énergétique de la France.* 2022.
97. **EDF.** *Le nucléaire en chiffres.*
www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres.
98. **INSEE.** *Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie par filière renouvelable.* s.l. : www.insee.fr/fr/statistiques/4469376#tableau-figure1, 2022.
99. **al, Campbell et.** *Geochemical Negative Emissions Technologies: Part I. Review.* 2022.
100. **ADEME.** *Forêts et usages du bois dans l'atténuation du changement climatique.* 2021.
101. **INSEE.** *Population 2050.* [Online]
www.insee.fr/fr/statistiques/1375921?sommaire=1375935#:~:text=En%202050%2C%20la%20France%20m%C3%A9tropolitaine,une%20sur%20cinq%20en%202000.
102. **AGRESTE.** *Récolte de bois et production de sciages en 2021.* 2023.
103. **SGPE.** *La planification écologique dans l'énergie.* 2023.
104. **SNEB.** *Les spécialistes de la fertilisation.* [Online] www.sneb-engrais.fr/amendements/20-dolomie.html.
105. **Concawe.** *E-Fuels: A technoeconomic assessment of European domestic production and imports towards 2050.* 2022.

106. **INSEE.** *surface agricole en France.* [Online]
[www.insee.fr/fr/statistiques/5039859?sommaire=5040030#:~:text=En%20France%2C%20en%202019%2C%20la,cultures%20permanentes%20\(figure%201\).](http://www.insee.fr/fr/statistiques/5039859?sommaire=5040030#:~:text=En%20France%2C%20en%202019%2C%20la,cultures%20permanentes%20(figure%201).)
107. **ONRB.** *Les Etudes de FranceAgriMer.* 2016.
108. **Réserve régional des tourbières des Saisies Beaufortain Val d'Arly.** *Qu'est-ce qu'une tourbière ?* s.l. :
www.reserve-regionale-tourbiere-des-saisies.com/tourbiere/.
109. **L'Info Durable.** *Municipales : ces grandes villes qui passent au vert.* 2020.
110. **La Gazette.** *2,8% des Français ont un maire écolo.* 2020.
111. **Info Compensation Carbone.** *Etat des lieux de la compensation carbone en France – Edition 2022.* 2022.
112. **Le Monde.** *Eoliennes : les raisons du retard de la France en matière de production et d'installation.* 2022.
113. **Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer.** *Atlas régional de l'occupation des sols en France.* 2016.
114. **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.** *Programmation Pluriannuelle de l'Energie.* 2018.
115. **Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.** *Stratégie nationale bas-carbone.* 2020.
116. **Running Tide.** [Online] www.runningtide.com/carbonremoval.
117. **INRAE.** *Drainage des tourbières pour l'agriculture : estimation des émissions de carbone sur le dernier millénaire.* 2021.
118. **MTES.** *Gisement de chaleur fatale à proximité de réseaux de chaleurs.* [Online]
www.ecologie.gouv.fr/chaleur-recuperation-des-processus-industriels.
119. *Scientific advice for the determination of an EU-wide 2040 climate target and a greenhouse gas budget for 2030–2050.* **Change, European Scientific Advisory Board on Climate.** 2023. 978–92–9480–584–3.
120. *Reducing the risks of climate overshoot.* **Commission, Climate Overshoot.** 2023.
121. **Gap, Carbon.** *How to avoid carbon removal delaying emissions reductions.* 2023.
122. **BRGM.** *Carbonates calcaïques et magnésiens et produits dérivés à usage industriel et agricole.* 2000.
123. *Assessing the capacity of Seagrass meadows for carbon burial : Current limitations and future strategies.* **Carlos M. Duarte, Hilary Kennedy, Núria Marbà, Iris Hendriks.** s.l. : Ocean & Coastal Management, 2013, Vol. 83.
124. *Toward a coordinated global observing system for seagrasses and marine macroalgae.* **J. Emmett Duffy, Lisandro Benedetti-Cecchi, Joaquin Trinanes.** s.l. : Frontiers in Marine Science, 2019, Vol. 6.
125. **CDR Primer.** *The Building blocs of CDR systems.* s.l. : <https://cdrprimer.org/read/chapter-2>, 2021.
126. *Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration.* **Dorte Krause-Jensen, Carlos M. Duarte.** s.l. : Nature Geoscience, 2016, Vol. 9.
127. *Silicate Production and Availability for Mineral Carbonation.* **P. Renforth, C.-L. Washbourne, J. Taylder, and D. A. C. Manning.** s.l. : Environmental Science & Technology, 2011.
128. *Negative CO₂ emissions via enhanced silicate weathering in coastal environment.* **Filip J. R. Meysman and Francesc Montserrat.** s.l. : Biology letters, 2017.

Liste des figures, tableaux et encadrés

Figure 1 Réactions de minéralisation provoquées par la dissolution de certains minéraux silicatés (National Academies of Sciences 2019).....	15
Figure 2 Vue d'ensemble des solutions d'EDC retenues. Adapté de (2)	17
Figure 3 Aperçu des données collectées sur les besoins en ressources pour l'altération accélérée, la DACCS et la DOCCS.	19
Figure 4 Bilan de la production (gauche) et de la consommation (droite) d'électricité (en TWh) à long terme (2050) et mise en exergue du gisement d'électricité disponible pour les technologies d'EDC	20
Figure 5 Estimation des productions maximales et des gisements d'électricité renouvelable disponibles à pour l'EDC (en TWh)	21
Figure 6 Méthodologie d'estimation du gisement des méthodes EDC associées à un intrant biomasse.....	24
Figure 7 Estimation du gisement disponible de biomasse non forestière pour l'EDC, en Mt/an (MS ou MB)	25
Figure 8 Estimation du gisement de bois disponible pour l'EDC, en Mm ³ /an.....	25
Figure 9 Evolution de la répartition des terres (Mha) entre 2017-2020 et 2050 selon le scénario S1 de l'ADEME (20)	27
Figure 10 Superficies sur lesquelles les pratiques stockantes agricoles, des prairies et viticoles pourraient se déployer en théorie (sans contraintes) et de manière réaliste en 2020, en Mha (12)	29
Figure 11 Superficies sur lesquelles les pratiques stockantes agricoles, des prairies et viticoles pourraient plausiblement se déployer en 2020 et en 2050, en millions d'hectares (ADEME et INRAE)	29
Figure 12 Répartition des différents types de côtes françaises (23).....	31
Figure 13 Localisation de mangroves à travers le monde : focus sur les mangroves françaises (25).....	31
Figure 14 Superficie des herbiers marins en France selon les zones géographiques, en milliers d'hectares (24)	32
Figure 15 Représentations schématiques des différentes formes de stockage géologiques de CO ₂ : panel de gauche reproduit de (43), panel de droite reproduit de (44).....	37
Figure 16 Capacités de stockage théoriques en France métropolitaine.....	38
Figure 17 Capacités géologiques de CO ₂ en France métropolitaine estimées (Source : ministère de la transition écologique)	39
Figure 18 Capacités de stockage du CO ₂ onshore identifiées en France en 2022 (en MtCO ₂)	40
Figure 19 Différentes phases de déploiement des projets français CCUS, et leurs besoins de transport de CO ₂ associés.....	41
Figure 20 Illustration des liens de dépendance entre ressources nécessaires et méthodes d'EDC.....	43
Figure 21 Evolution des émissions et des puits de GES sur le territoire national entre 2005 et 2050 selon la SNBC 2.....	45
Figure 22 Respect des budgets carbone 2015-2018 et 2019-2023 de la France (58).....	45

Figure 23 Cartographie des acteurs de l'EDC en France.....	49
Figure 24 Allocation du gisement d'électricité et de chaleur parmi les différentes technologies électro-intensives.....	50
Figure 25 Potentiel d'EDC des différentes méthodes et technologies, avec allocation du gisement de ressources nécessaires [MtCO ₂ /an].....	53
Figure 26 Evolution annuelle du PIB en France de 1950 à 2022, en % par an (INSEE)	54
Figure 27 Répartition de la valeur ajoutée en France par branche, en 2022 (INSEE).....	54
Figure 28 Coût d'abattement des principales solutions d'EDC selon le GIEC, en USD / tCO ₂	55
Figure 29 Coût estimé du déploiement des puits naturels et technologiques additionnels entre 2017 et 2030, et entre 2017 et 2050, selon les scénarios de l'ADEME, en Md€/an (% part du PIB Français de 2021).....	56
Figure 30 Supplément d'investissement pour le déploiement de l'EDC en 2030 et en 2050 par rapport aux 69 milliards d'euros d'investissement annuels pour la transition écologique estimés par le rapport Pisani Ferry	57
Figure 31 Répartition des investissements supplémentaires nécessaires en 2030 pour atteindre la neutralité carbone en 2050 selon France Stratégie, en milliards d'euros par an (61).....	57
Figure 32 Moyens d'investir dans les solutions d'EDC (non exhaustif) par l'Etat et les collectivités locales, les entreprises et les ménages (auteur).....	59
Figure 33 Niveau de sensibilité de la population française aux problèmes environnementaux (66).....	61
Figure 34 Niveau de sensibilité environnementale de la population française en fonction de la classe d'âge (66)	61
Figure 35 Préoccupation des Français au sujet des enjeux environnementaux (66)	62
Figure 36 Discours pouvant retarder l'action climatique (67)	63
Figure 37 Evaluation du niveau d'acceptabilité des différentes méthodes d'EDC selon les personnes interviewées.....	66
Figure 38 Bilan des émissions de CO ₂ équivalent (MtCO ₂ eq/an) en 2050 selon les scénarios de l'ADEME Transitions 2050 et la SNBC 2.....	71
Figure 39 Catégorisation des Emissions résiduelles selon la SNBC 2 pour estimer les besoins en EDC permanente et non-permanente.....	71
Figure 40 Potentiel d'élimination de CO ₂ des solutions de l'EDC et du puits de carbone forestier (hors EDC) dans le scénario de référence en 2050, en MtCO ₂ eq/an	72
Figure 41 Comparaison de la permanence des émissions résiduelles avec les puits envisagés.....	72
Figure 42 Composition du puits de carbone total des scénarios conservateur, référence et ambition en 2050, comparé au volume d'émissions résiduelles anticipé par la SNBC 2, en MtCO ₂ eq/an	6,74
Figure 43 Comparaison de l'origine des émissions résiduelles avec la permanence des puits de carbone mobilisés dans les trois scénarios considérés.....	7,74

Figure 44 Puits (hors CSC) en 2050 selon les scénarios conservateur, référence et ambition, ceux de l'ADEME (S1, S2, S3, S4) et de la SNBC 2, en MtCO _{2eq} /an.....	75
Figure 45 Puits naturels en 2050 selon les scénarios conservateurs, référence et ambition, ceux de l'ADEME (S1, S2, S3, S4) de la SNBC 2, en MtCO _{2eq} /an.....	76
Figure 46 Puits technologiques (hors CSC) en 2050 selon les scénarios conservateur, référence et ambition, ceux de l'ADEME (S1, S2, S3, S4) de la SNBC, en MtCO ₂ /an.....	76
Figure 47 Estimation du gisement de chaleur fatale disponible pour l'EDC en 2050 dans le scénario de référence, [TWh/an]	77
Figure 48 Méthodologie pour estimer le volume d'électricité renouvelable disponible pour l'EDC dans le scénario de référence, TWh/an en 2050	80
Figure 49 Volume d'électricité disponible pour l'EDC selon les scénarios et les sources, TWh/an en 2050.....	80
Figure 50 Répartition du gisement d'électricité dans le scénario de référence parmi les différentes méthodes d'EDC consommant de l'électricité [TWh/an]	81
Figure 51 Potentiel d'EDC des méthodes consommatrices d'électricité en 2050 dans le scénario de référence et ambition [MtCO ₂ /an]	82
Figure 52 Potentiel de BECSC dans les différents scénarios, en MtCO ₂ /an en 2050	82
Figure 53 Elimination de CO ₂ par la BECSC en 2050 selon les scénarios de l'ADEME	83
Figure 54 Réduction du potentiel de BECSC de l'ADEME (S3) en prenant en compte la concurrence du CO ₂ biogénique avec l'aérien et le maritime	84
Figure 55 Potentiel d'élimination de CO ₂ des pratiques stockantes selon les scénarios, en 2050 et en MtCO _{2eq} /an.....	85
Figure 56 Prix de la tonne de CO ₂ (€/tCO _{2eq}) sur le marché volontaire de compensation carbone en France et dans le monde.....	85
Figure 57 Potentiel d'élimination de CO _{2eq} des pratiques stockantes selon la rémunération des acteurs en tonnes de CO ₂ absorbée, en MtCO _{2eq} /an, selon le merit order de l'INRAE et ajusté avec l'évolution des superficies de cultures, prairies et vignes vus par le scénario S3 de l'ADEME	86
Figure 58 Potentiel d'élimination de CO _{2eq} de la reforestation selon les scénarios, en 2050 en MtCO _{2eq} /an.....	87
Figure 59 Evolution des superficies forestières entre 2050 et aujourd'hui selon l'ADEME, le SGPE et des projections tendanciennes, en Mha par rapport à 2023.....	87
Figure 60 Evolution du puits de carbone forestier des forêts restant forêts, en Mha entre 2015 et 2050	88
Figure 61 Potentiel d'EDC des produits bois des scénarios ADEME en 2050 [MtCO ₂ /an]	89
Figure 62 Prise en compte de la contrainte de stockage géologique de CO ₂ sur le potentiel d'élimination de CO ₂ du BECSC et du DACCS dans le scénario de référence, en MtCO ₂ /an en 2050.....	91
Figure 63 Coûts annuels pour mettre en œuvre les méthodes d'EDC retenues selon le scénario considéré (en Milliards d'euros)	92

Figure 64 Potentiel d'élimination de CO ₂ des solutions de l'EDC et du puits de carbone forestiers (hors EDC) dans le scénario de référence en 2030 (en Mt/an).....	93
Figure 65 Liste des roches impliquées dans une réaction de carbonatation aqueuse et utilisables pour l'altération accélérée terrestre et l'alcalinisation des océans par voie minérale (76).....	109
Figure 66 Liste des roches impliquées dans une réaction de carbonatation solide et utilisables pour l'altération accélérée terrestre et l'alcalinisation des océans par voie minérale (Campbell et al 2022).....	110
Figure 67 Méthodologie d'estimation du gisement des méthodes EDC associées à un intrant biomasse	111
Figure 68 Dynamique de croissance des forêts en 2019.....	113
Figure 69 Flux de la filière bois en 2021.....	114
Figure 70 Illustration de la notion de like-for-like au travers de la comparaison de différents états d'équilibre des flux de carbones avec l'atmosphère.....	119
Figure 71 Répartition du gisement d'électricité parmi les différentes méthodes d'EDC consommant de l'électricité dans le scénario ambition en 2050 [TWh/an]	121
Figure 72 Evolution du mix de carburants dans le scénario S3 de la feuille de route de décarbonation de la filière maritime	122
Figure 73 Réduction du potentiel de BECSC de l'ADEME (S4) en prenant en compte la concurrence du CO ₂ biogénique avec l'aérien et le maritime	123

Liste des tableaux

Tableau 1 Répartition du gisement de chaleur fatale de l'industrie (19).....	22
Tableau 2 Présentation des différentes catégories et types de biomasse (cf. détail de la méthodologie ci-dessous pour les sources utilisées)	23
Tableau 3 Scénario d'évolution la plus favorable des superficies terrestres	28
Tableau 4 Part des surfaces disponibles sur lesquelles les pratiques stockantes pourraient se mettre en œuvre	30
Tableau 5 Gisements théoriques maximaux en roches pour faire de l'EDC	34
Tableau 6 Budgets carbone de la France ajustés en juillet 2022 (57).....	44
Tableau 7 Allocation des gisements des sous-catégories de biomasse Rouge – Type de biomasse non exploitable pour l'EDC, Vert – Type de biomasse exploitable pour l'EDC	51
Tableau 8 Gisements et potentiel d'élimination théoriques maximaux des méthodes d'EDC.....	52
Tableau 9 Synthèse des points de vue généraux des quatre grandes catégories d'acteurs de la société française sur les solutions d'EDC	60
Tableau 10 Influence des imaginaires sur le modèle économique et les modes de vie (ADEME, Transitions 2050 2021).....	67

Tableau 11 Influence des imaginaires sur le développement des solutions EDC dans les scénarios de l'ADEME (ADEME, Transitions 2050, 2021).....	68
Tableau 12 Gisement utilisable de roches pour de l'altération accélérée en 2050 dans les trois scénarios [Mt/an]	79
Tableau 13 Synthèse des potentiels d'élimination de CO ₂ de chaque méthode d'EDC à horizon 2030	94
Tableau 14 Sources utilisées pour estimer le gisement selon le type de biomasse.....	111
Tableau 15 Méthodologie d'estimation des gisements des pratiques stockantes agricoles, viticoles et liées aux prairies selon l'INRAE (12)	116
Tableau 16 Facteurs de conversion énergétique de la biomasse pour le BECSC et potentiel théorique maximal de valorisation énergétique totale de la biomasse disponible pour le BECSC en 2050	117
Tableau 17 Gisements théoriques maximums en ressources (partie 5) et utilisation des ressources (avec ou sans contrainte sur le stockage géologique de CO ₂) dans le scénario de référence.....	118
Tableau 18 Calcul du bilan GES des pratiques stockantes (sur l'ensemble du profil du sol) en 2020 selon l'INRAE	120
Tableau 19 Coûts de capture à maturité pour les différentes méthodes d'EDC selon State of CDR (78)	123

Liste des encadrés

Encadré 1 Méthodologie estimation du gisement en électricité.....	20
Encadré 2 Méthodologie d'estimation du gisement de chaleur.....	22
Encadré 3 Méthodologie d'estimation du gisement en biomasse	24
Encadré 4 Méthodologie d'estimation des gisements en superficies pour l'afforestation et la reforestation, l'augmentation des superficies des tourbières et les pratiques stockantes, en 2050.....	26
Encadré 5 Méthodologie d'estimation du gisement théorique maximal d'augmentation des superficies des herbiers et de superficies de mise en oeuvre des pratiques stockantes des herbiers	33
Encadré 6 Méthodologie pour estimer les gisements théoriques maximaux de roches pour faire de l'EDC en France.....	35

10. Annexes

10.1. Réactions chimiques impliquées dans l'altération accélérée terrestre et l'alcalinisation minérale des océans

Le document « *Geochemical Negative Emissions Technologies : Part I. Review* » de Campbell et al (2022) liste toutes les roches utilisées dans les processus d'altération accélérée terrestre et d'alcalinisation des océans par voie chimique, et les réactions chimiques associées. Il classe les réactions chimiques en deux catégories :

- **Carbonatation aqueuse** : Ce processus implique la réaction du CO₂ avec des minéraux en phase aqueuse, pour former des carbonates solubles.
- **Carbonatation solide** : Dans ce cas, le CO₂ réagit avec les minéraux, à l'air libre, l'humidité étant un catalyseur de ces réactions.

Ces réactions sont présentées ci-dessous. Les mots surlignés en jaune dans les figures ci-dessous correspondent aux roches dont le gisement a été estimé dans ce rapport.

Minéraux	Formule chimique	Réaction chimique
Carbonation – aqueous		
Calcite	CaCO ₃	CaCO ₃ + CO ₂ + H ₂ O → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Chrysotile	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄ + 6CO ₂ + 5H ₂ O → 3Mg ²⁺ + 6HCO ₃ ⁻ + 2H ₄ SiO ₄
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	CaMg(CO ₃) ₂ + 2CO ₂ + 2H ₂ O → Mg ²⁺ + Ca ²⁺ + 4HCO ₃ ⁻
Hydromagnesite	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·4H ₂ O	Mg ₅ (CO ₃) ₄ (OH) ₂ ·4H ₂ O + 6CO ₂ → 5Mg ²⁺ + 10HCO ₃ ⁻
Ikaite	CaCO ₃ ·6H ₂ O	CaCO ₃ ·6H ₂ O + CO ₂ → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ + 5H ₂ O
Magnesite	MgCO ₃	MgCO ₃ + CO ₂ + H ₂ O → Mg ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Monohydrocalcite	CaCO ₃ ·H ₂ O	CaCO ₃ ·H ₂ O + CO ₂ → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Nesquehonite	MgCO ₃ ·3H ₂ O	MgCO ₃ ·3H ₂ O + CO ₂ → Mg ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ + 2H ₂ O
Sodium carbonate	Na ₂ CO ₃	Na ₂ CO ₃ + CO ₂ + H ₂ O → 2Na ⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Thermonatrite	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃ ·H ₂ O + CO ₂ → 2Na ⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Anorthite	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	CaAl ₂ Si ₂ O ₈ + 2CO ₂ + 3H ₂ O → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ + Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Diopside	MgCaSi ₂ O ₆	MgCaSi ₂ O ₆ + 4CO ₂ + 6H ₂ O → Ca ²⁺ + Mg ²⁺ + 4HCO ₃ ⁻ + 2H ₄ SiO ₄
Forsterite	Mg ₂ SiO ₄	Mg ₂ SiO ₄ + 4CO ₂ + 4H ₂ O → 2Mg ²⁺ + 4HCO ₃ ⁻ + H ₄ SiO ₄
Jennite	Ca ₉ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₆ ·8H ₂ O	Ca ₉ Si ₆ O ₁₈ (OH) ₆ ·8H ₂ O + 18CO ₂ + 10H ₂ O → 9Ca ²⁺ + 18HCO ₃ ⁻ + 6H ₄ SiO ₄
Larnite	Ca ₂ SiO ₄	Ca ₂ SiO ₄ + 4CO ₂ + 4H ₂ O → 2Ca ²⁺ + 4HCO ₃ ⁻ + H ₄ SiO ₄
Rankinite	Ca ₃ Si ₂ O ₇	Ca ₃ Si ₂ O ₇ + 6CO ₂ + 7H ₂ O → 3Ca ²⁺ + 6HCO ₃ ⁻ + 2H ₄ SiO ₄
Tobermorite	Ca ₅ Si ₆ O ₁₂ (OH) ₁₀ ·5H ₂ O	Ca ₅ Si ₆ O ₁₂ (OH) ₁₀ ·5H ₂ O + 10CO ₂ + 7H ₂ O → 5Ca ²⁺ + 10HCO ₃ ⁻ + 6H ₄ SiO ₄
Wollastonite	CaSiO ₃	CaSiO ₃ + 2CO ₂ + 3H ₂ O → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ + H ₄ SiO ₄
Brucite	Mg(OH) ₂	Mg(OH) ₂ + 2CO ₂ → Mg ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Lime	CaO	CaO + 2CO ₂ + H ₂ O → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Periclase	MgO	MgO + 2CO ₂ + H ₂ O → Mg ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻
Portlandite	Ca(OH) ₂	Ca(OH) ₂ + 2CO ₂ → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻
CAH10	CaAl ₂ O ₄ ·10H ₂ O	CaAl ₂ O ₄ ·10H ₂ O + 2CO ₂ → Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ + 2Al(OH) ₃ + 6H ₂ O
C2AH8	Ca ₂ Al ₂ O ₅ ·8H ₂ O	Ca ₂ Al ₂ O ₅ ·8H ₂ O + 4CO ₂ → 2Ca ²⁺ + 4HCO ₃ ⁻ + 2Al(OH) ₃ + 3H ₂ O
C3AH6	Ca ₃ Al ₂ (OH) ₁₂	Ca ₃ Al ₂ (OH) ₁₂ + 6CO ₂ → 3Ca ²⁺ + 6HCO ₃ ⁻ + 2Al(OH) ₃
C4AH13	Ca ₄ Al ₂ O ₇ ·13H ₂ O	Ca ₄ Al ₂ O ₇ ·13H ₂ O + 8CO ₂ → 4Ca ²⁺ + 8HCO ₃ ⁻ + 2Al(OH) ₃ + 6H ₂ O

Figure 65 – Liste des roches impliquées dans une réaction de carbonatation aqueuse et utilisables pour l'altération accélérée terrestre et l'alcalinisation des océans par voie minérale (76)

La liste des minéraux impliqués dans une réaction de carbonatation solide est présentée ci-dessous. Les mots surlignés en jaune correspondent également aux roches dont le gisement a été étudié dans ce rapport.

Minéraux	Formule chimique	Réaction chimique
Carbonation – solid		
Anorthite	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
Diopside	$\text{MgCaSi}_2\text{O}_6$	$\text{MgCaSi}_2\text{O}_6 + 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$
Forsterite	Mg_2SiO_4	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{MgCO}_3 + \text{H}_4\text{SiO}_4$
Gehlenite	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + 2\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaCO}_3 + 2\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{SiO}_4$
Jennite	$\text{Ca}_9\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_9\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_6 \cdot 8\text{H}_2\text{O} + 9\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 9\text{CaCO}_3 + 6\text{H}_4\text{SiO}_4$
Larnite	Ca_2SiO_4	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CaCO}_3 + \text{H}_4\text{SiO}_4$
Lime	CaO	$\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$
Merwinite	$\text{MgCa}_3\text{Si}_2\text{O}_8$	$\text{MgCa}_3\text{Si}_2\text{O}_8 + 4\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3 + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$
Rankinite	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7$	$\text{Ca}_3\text{Si}_2\text{O}_7 + 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + 2\text{H}_4\text{SiO}_4$
Tobermorite	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{12}(\text{OH})_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{12}(\text{OH})_{10} \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 5\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 5\text{CaCO}_3 + 6\text{H}_4\text{SiO}_4$
Wollastonite	CaSiO_3	$\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_4\text{SiO}_4$
Brucite	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	$\text{Mg}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{MgCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Periclase	MgO	$\text{MgO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{MgCO}_3$
		Amorphous silica precipitation*
		$\text{H}_4\text{SiO}_4 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Figure 66 – Liste des roches impliquées dans une réaction de carbonatation solide et utilisables pour l'altération accélérée terrestre et l'alcalinisation des océans par voie minérale (Campbell et al 2022)

10.2. Annexe : Description des sources utilisées pour l'estimation du gisement en biomasse

Dans les grandes lignes, la méthodologie utilisée pour estimer le gisement en biomasse a été, pour chaque type de biomasse :

- 1) Identifier le volume de biomasse total produit annuellement
- 2) Retrancher les volumes contraints (contraintes techniques et volumes non pertinents pour l'EDC)
- 3) Retrancher les volumes affectés en priorité à d'autres usages (alimentation, meilleure gestion des sols, etc.)
- 4) Répartir les volumes restant entre les différentes usages (méthanisation, combustion, recyclage, matériaux) qui peuvent être fléchés vers des méthodes d'EDC
- 5) Sommer les volumes selon les usages utiles aux méthodes d'EDC (combustion et méthanisation pour le BECSC, matériaux et recyclage pour produits biosourcés, et biochar)

La méthodologie est résumée dans le schéma ci-dessous.

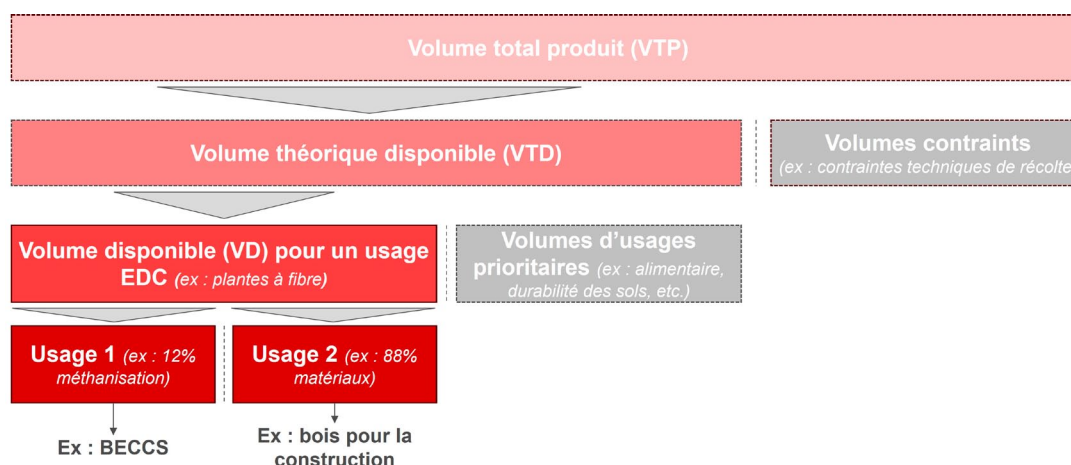


Figure 67 – Méthodologie d'estimation du gisement des méthodes EDC associées à un intrant biomasse

Cette méthodologie se décline selon le type de biomasse en fonction des données disponibles. Le détail est présenté dans le tableau ci-dessous. Les sources principales utilisées dans le tableau ci-dessous sont :

- ONRB : Observatoire National des Ressources en Biomasse
- Base de données Modecom (2017)
- Base de données SINOE, gérée par l'ADEME (2021)
- Inventaire forestier de l'IGN (2012 – 2020)
- ADEME, « Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? » (2018)
- Base de données Agreste (2021)

Ces sources ont été utilisées pour estimer les gisements en biomasse des types de biomasse suivants.

Catégorie	Type de biomasse	Source
Biomasse issue de l'agriculture non alimentaire	Cultures dédiées	ONRB
	Cultures intermédiaires	France Stratégie
	Déchets agricoles	ONRB / France Stratégie
	Effluents d'élevage	ONRB
	Plantes à fibre	ONRB
	Plantes à parfum	ONRB
Déchets urbains	Déchets verts urbains	ONRB / Modecom
	Huiles alimentaires usagées	France AgriMer
	Déchets papiers/cartons	Modecom
	Déchets issus du bois	Modecom
	Boues d'épuration	SDES
	Déchets ménagers	Modecom
Coproduits de l'industrie agro-alimentaire	Trituration oléagineux	ONRB
	Betterave sucrerie	ONRB
	Fruits-légumes transfo.	ONRB
	Vinification	ONRB
	Industries des viandes	ONRB
	Ovoproduits	ONRB
	Pêche et aquaculture	ONRB
	Distillation vinicole	ONRB
	Cidrerie	ONRB
	Pomme de terre	ONRB
	Haies et agroforesterie	France Stratégie
	Prélèvements forêts	Agreste/IGN

Tableau 14 – Sources utilisées pour estimer le gisement selon le type de biomasse

ONRB

L'ONRB (Observatoire Nationale des Ressources en Biomasse) donne des données de volumes produits, des contraintes de collecte et des usages prioritaires de la biomasse pour les types de biomasse mentionnés dans le tableau ci-dessus.

SDES

Pour le gisement des boues d'épuration, les données proviennent de la base de données SDES des volumes traités en station d'épuration. La base de données donne les volumes d'eaux résiduaires urbaines collectées en 2016 ainsi que leurs utilisations. Pour ces déchets, le volume collecté par les stations d'épuration est considéré comme étant directement le VTD (Volume théorique disponible). Pour estimer le volume disponible (VD), les usages agronomiques de ces boues (épandage, composte, etc.) ont été considérés prioritaires.

Modecom

La base de données Modecom-2017 a été utilisée afin d'estimer les volumes collectés annuellement des déchets suivants :

- Les déchets verts urbains (déchets de jardin)
- Les déchets papiers/cartons
- Les déchets issus du bois
- Les déchets alimentaires

Cette base de données provient de la campagne de caractérisation des déchets effectuée par l'ADEME sur le territoire métropolitain. Les données de cette campagne recensent les déchets de collecte classique (ordures ménagères et assimilées) et les déchets issus de déchetterie. Cette étude permet d'effectuer un regroupement précis des types de déchets collectés selon les quatre catégories de déchets listées plus haut sur l'année 2017. La base de données SINOE, gérée par l'ADEME, fournit des données pour l'année 2021 mais avec des catégories de déchets moins précises que celles utilisées dans Modecom. La répartition des déchets selon les catégories de Modecom a été appliquée aux données de collecte de SINOE de 2021 afin d'avoir une approximation des volumes traités dans chaque catégorie en 2021 et déduire les VTD (Volumes théoriques disponibles).

Ensuite, aucun usage prioritaire n'a été identifié pour ces catégories, l'intégralité du VTD a donc été considéré comme valorisable pour des usages permettant la capture et le stockage du carbone. Le VD (Volume Disponible) est donc égal au VTD (Volume Théorique Disponible).

IGN / ADEME / Agreste

L'IGN, l'ADEME et Agreste permettent de déterminer les prélèvements de bois en forêts et la biomasse disponible issue de l'agroforesterie. Le gisement de bois se retrouve en effet dans la biomasse forestière mais aussi dans l'agroforesterie.

Biomasse forestière :

Pour la biomasse forestière, le volume total produit (VTP) est considéré comme étant la production biologique annuelle des forêts estimée par l'inventaire forestier IGN. Ce volume est une moyenne annuelle calculée sur les années 2012-2020 et donne le volume de bois produit biologiquement chaque année qui serait prélevable sans déforester.

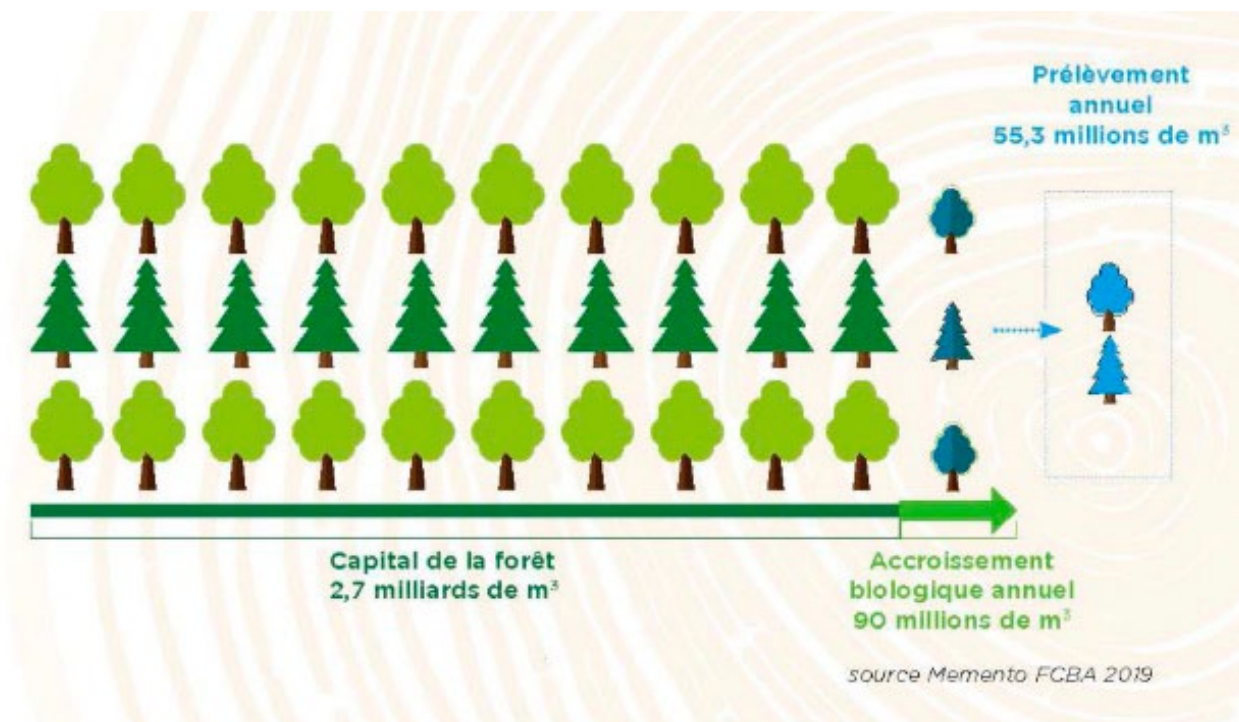


Figure 68 – Dynamique de croissance des forêts en 2019

L'ADEME dans « *Transitions 2050* » décrit deux scénarios de sylviculture : un scénario « sylviculture constante », dans lequel le prélèvement annuel en 2050 serait égal au prélèvement actuel d'environ 55 Mm³/an et un scénario « sylviculture dynamique » avec un prélèvement annuel en 2050 de 91 Mm³/an.

Le scénario choisi dans ce rapport est celui d'une sylviculture constante, étant donné les dernières études de l'IGN. Ce dernier établit une baisse de la production biologique annuelle passant de 91,5 Mm³/an entre 2005 et 2013 à 87,8 Mm³/an entre 2013 et 2021. En parallèle la mortalité est perçue en nette hausse (+80%) sur la même période avec 13,1 Mm³/an entre 2013 et 2021 contre 7,4 Mm³/an entre 2005 et 2013 (77).

Le volume théoriquement disponible (VTD) de biomasse forestière correspond au volume de bois réellement prélevé qui pourrait, en théorie, être intégralement fléché vers des utilisations permettant de faire de l'EDC.

Le volume disponible (VD) de biomasse forestière a été estimé à partir de la base de données Agreste. Celle-ci donne les volumes commercialisés ainsi que leur répartition dans les principaux usages (bois d'œuvre/bois industrie et bois énergie) pour l'année 2021.

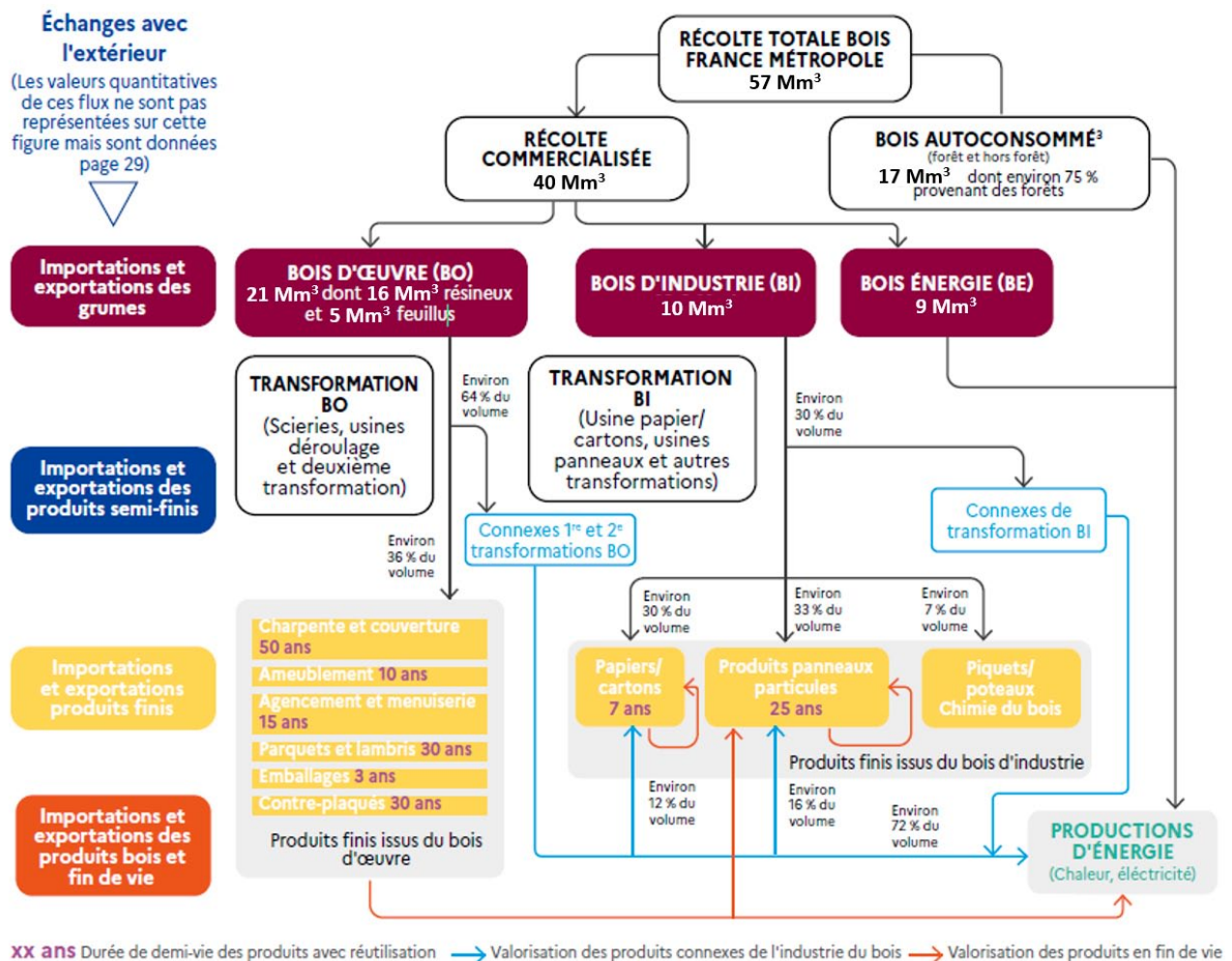


Figure 69 – Flux de la filière bois en 2021

Le bois prélevé est soit commercialisé, soit autoconsommé (principalement par les particuliers). Seul le bois commercialisé est pris en compte pour faire de l'EDC.

Par ailleurs, les emballages et les papiers/cartons n'ont pas été prises en compte dans le volume de bois valorisable pour l'EDC car leur durée de vie est inférieure à 10 ans.

La consommation de bois pour la production d'emballages a été estimée à partir du rapport du pôle emballage bois de 2019. Cette estimation a permis de déterminer la proportion de bois d'œuvre dédié aux emballages en 2019, et cette proportion a pu être appliquée aux volumes de bois d'œuvre de 2021 donnés par Agreste.

Finalement, le volume de bois disponible pour l'EDC est obtenu soustrayant au volume de bois prélevé le volume autoconsommé et le volume dédié à des produits bois à durée de vie inférieure à 10 ans.

Biomasse d'agroforesterie :

Pour l'agroforesterie, les données proviennent du rapport de France Stratégie. L'évaluation du gisement réalisée reprend l'estimation du volume total produit (VTP) de bois en agroforesterie effectuée par l'ADEME en 2014. Viennent ensuite s'appliquer les volumes contraints, à savoir la rentabilité d'exploitation du gisement. Pour l'agroforesterie, France Stratégie n'a considéré aucune contrainte de retour au sol liée à l'agronomie. L'application de ces contraintes permet d'estimer le volume théoriquement disponible (VTD). Puis, il n'y a pas d'usage prioritaire identifié incompatible avec des méthodes d'EDC (ex BECSC). Le volume disponible (VD) est ainsi égal au volume théoriquement disponible (VTD).

France AgriMer

La source France AgriMer permet de définir les volumes d'huiles alimentaires usagées disponibles pour l'EDC. Selon cette source, les données du volume total produit, et des collectes d'huiles alimentaires usagées sont estimées sur l'année 2014.

Il n'existe à priori pas de volumes contraints dans le gisement d'huile usagés, ainsi le volume théoriquement disponible (VTD) est égal au volume total produit (VTP) d'huiles alimentaires usagées.

Par ailleurs, il n'existe à priori pas d'usage prioritaire d'utilisation des huiles usagés autre que la production de biocarburant, ainsi le volume disponible (VD) est égal au volume théoriquement disponible (VTD).

10.3. Annexe : Critères utilisés par l'INRAE pour estimer le gisement en superficie des pratiques stockantes l'alcalinisation minérale des océans

Pratiques stockantes	Description	Critères utilisés par l'INRAE pour estimer le gisement en superficies de mise en œuvre des pratiques
Surfaces agricoles		
Développement de l'agroforesterie dans les parcelles cultivées	Introduire des arbres au sein de parcelles agricoles cultivées	<ol style="list-style-type: none"> 1. Une taille minimale de parcelle d'un hectare 2. Une profondeur de sol supérieure à 1 m 3. Un sol non hydromorphe 4. Exclusion des vignes et des vergers 5. Exclusion des prairies permanentes
Insertion ou allongement des prairies temporaires dans les rotations de culture	1. Insertion de prairies temporaires dans les rotations de culture sans prairie, en remplacement des cultures de maïs fourrage	1. Prairies intermédiaires insérées uniquement dans les rotations de culture contenant du maïs fourrage, en remplacement de celui-ci
	2. Allongement du nombre d'années de prairies temporaires dans les rotations de culture comportant déjà des prairies temporaires	1. Seules les prairies temporaires de moins de cinq ans ont été prises en compte (sinon elles deviennent des prairies permanentes)
Insérer des cultures intermédiaires et allonger les existantes	Insérer des cultures intermédiaires à fort capture d'azote entre la récolte d'une culture principale et le semis de la culture suivante	<ol style="list-style-type: none"> 1. Implantation des CI en dehors des Zones Vulnérables Nitrates (ZVN) 2. Non prise en compte des dérogations dans les ZVN (dérogations récolte tardive et dérogations argile) 3. Insertion des CI en interculture courte d'été et après du maïs grain 4. Détruire le plus tardivement possible les CI (1 mois avant le semis de la culture principale au printemps ou quelques jours avant le semis de la culture principale à l'automne) 5. Durée minimale de l'interculture de deux mois 6. Pas de limite à l'implantation des CI en fonction du % d'argile dans le sol 7. Comparaison avec un scénario de référence avec des critères sur les durées, les cultures principales, etc.

>>

Pratiques stockantes	Description	Critères utilisés par l'INRAE pour estimer le gisement en superficies de mise en œuvre des pratiques
Surfaces agricoles		
Passage au semis direct et abandon du labour	Semer directement dans les résidus d'une culture précédente (couvert végétal, culture principale précédente, etc...), sans labour	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exclusion des terres hydromorphes 2. Exclusion des surfaces sur lesquelles sont cultivé des essences qui ont beaucoup de difficultés à être pratiquées avec du semis direct tout en gardant un bon rendement (betterave à sucre, maïs grain en monoculture, tournesol, pomme de terre)
Épandage de nouvelles ressources organiques	Épandage de ressources organiques (effluents d'élevage, boues d'épuration urbaine, digestats issues de méthanisation, composts et effluents industriels) dans les surfaces cultivées	<ol style="list-style-type: none"> 1. Manque de quantité de nouvelles ressources organiques (NRO) disponibles 2. Restriction aux surfaces agricoles avec blé et colza pour l'épandage de composts, et aux successions avec maïs et tournesol pour les digestats
Plantation de haie aux bords des champs	Plantation de haies (arbustes et arbres de haut-jet) autour des surfaces agricoles	<ol style="list-style-type: none"> 1. Profondeur de sol supérieure à 50 cm 2. Exclusion de l'implantation de haies autour des parcelles inférieures à huit hectares 3. Pas d'implantation de haies au milieu d'une parcelle d'un seul tenant 4. Exclusion des vignes et des vergers 5. Exclusion des prairies permanentes
Vignes		
Enherbement des inter-rangs des vignobles toute l'année	Semer, maintenir et entretenir un couvert végétal (herbe) entre les rangs de vignes toute l'année	<ol style="list-style-type: none"> 1. Forte perte de rendement résultant de l'enherbement permanent dans certains vignobles 2. Forte pierrosité du sol (présence de pierres de taille importante dans les sols des vignobles) 3. Exclusion des surfaces de vignes dans les départements non associés à des vignobles 4. Exclusion des superficies où ces pratiques sont déjà mises en œuvre
Enherbement des inter-rangs des vignobles l'hiver uniquement	Semer, maintenir et entretenir un couvert végétal (herbe) entre les rangs de vignes l'hiver uniquement	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exclusion des surfaces de vignes dans les départements non associés à des vignobles 2. Exclusion des superficies où ces pratiques sont déjà mises en œuvre
Prairies permanentes		
Substituer du pâturage à la fauche	Augmenter le nombre de récolte de l'herbe réalisée par le pâturage au lieu de la fauche	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uniquement les prairies permanentes gérées avec les modes d'exploitation 8, 9, 10 et 20
Augmenter modérément la fertilisation minérale azotée des prairies permanentes	Augmenter les quantités d'engrais azotés d'origine minérale donnés aux surfaces de prairies permanentes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Uniquement les prairies permanentes gérées avec les modes d'exploitation 1, 2, 4, 12, 15, 21 et 24

Tableau 15 – Méthodologie d'estimation des gisements des pratiques stockantes agricoles, viticoles et liées aux prairies selon l'INRAE (12)

10.4. Annexe : Conversion de la biomasse en énergie

Dans le tableau ci-dessous, pour toutes les catégories de biomasse pertinentes, un potentiel énergétique a été calculé, notamment pour les gisements qui font l'objet d'un usage sous forme de combustion ou de méthanisation. Au total, cela représente un potentiel de 225 TWh d'énergie thermique qui pourrait être produit.

Biomasse	Usage	Unité	Volume	Facteur conversion [Mtep/Mt ou Mm³]	Potentiel énergétique [TWh]
Biomasse agricole					123
Cultures dédiées	Combustion	MtMS	0,070	0,4	0,4
Cultures intermédiaires	Méthanisation	MtMS	4,4	0,2	10,6
Déchets agricoles	Combustion	MtMS	7,3	0,4	33,3
Déchets agricoles	Méthanisation	MtMS	10,5	0,2	24,2
Effluents d'élevage lisier	Méthanisation	MtMS	1,6	0,18	3,3
Effluents d'élevage fumier	Méthanisation	MtMS	23,1	0,19	50,8
Plantes à fibre	Combustion	MtMB	0,1	0,4	0,3
Plantes à parfum	Combustion	MtMS	0,014	0,4	0,1
Plantes à parfum	Méthanisation	MtMS	0,011	0,2	/
Déchets urbains					20,4
Déchets urbains verts	Méthanisation	MtMS	5,122	0,2	11,5
Huiles alimentaires usagées	Biocarburants	MtMB	0,08	0,5	0,4
Déchets issus de bois	Combustion	MtMB	0,49	0,4	2,1
Boues d'épuration	Méthanisation	MtMS	0,16	0,1	0,2
Déchets ménagers	Méthanisation	MtMB	4,91	0,1	6,2
Coproduits des industries agroalimentaires					9,9
Trituration oléagineux	Biocarburants	MtMB	0,64	0,9	7,0
Betteraves sucrerie	Méthanisation	MtMB	0,15	0,2	0,3
Vinification	Méthanisation	MtMB	0,06	0,1	0,1
Industrie des viandes	Biocarburants	MtMB	0,19	0,9	2,1
Pêche et aquaculture	Biocarburants	MtMB	0,04	0,9	0,4
Forêts					59,3
Haies et agroforesterie	Combustion	Mm³	3,09	0,207	7,4
Prélèvements bois	Combustion	Mm³	21,5	0,207	49,9
Pré-total					210
Algues	Méthanisation	/	/	/	15
Total					225

Tableau 16 – Facteurs de conversion énergétique de la biomasse pour le BECSC et potentiel théorique maximal de valorisation énergétique totale de la biomasse disponible pour le BECSC en 2050

10.5. Annexe : Facteurs limitants pour établir le scénario de référence

Le tableau ci-dessous présente les gisements théoriques maximums (de la partie 5) et les gisements en ressources utilisés dans le scénario de référence.

Ressource	Méthode d'EDC	Gisement théorique maximal en ressources	Utilisation des ressources (sans contrainte stockage CO ₂)	Utilisation des ressources (avec contrainte stockage CO ₂)
Electricité	DACCS électrochimique	185 TWh _e	15 TWh _e	10 TWh _e
	S-DACCS (low-temp)	185 TWh _e	2,7 TWh _e	1,7 TWh _e
	Altération accélérée	185 TWh _e	0,5 TWh _e	0,5 TWh _e
Chaleur	S-DACCS (low-temp)	53 TWh _{th}	14 TWh _{th}	9 TWh _{th}
	Altération accélérée	53 TWh _{th}	3 TWh _{th}	3 TWh _{th}
Surfaces de nouvelles terres (forêts, tourbières, herbiers, mangroves)	Reforestation / Afforestation	+2,9 Mha	+0,9 Mha	+0,9 Mha
	Augmentation superficies tourbières	+0,01 Mha	+ 0 Mha	+ 0 Mha
	Augmentation superficies herbiers et mangroves	+ 0,008 Mha	+ 0 Mha	+ 0 Mha
Surfaces pour pratiques stockantes	Pratiques stockantes	Selon les pratiques	Selon les pratiques	Selon les pratiques
Biomasse	BECCS	212 TWh _{th}	28 TWh _{th}	18 TWh _{th}
	Produits biosourcés	9,5 Mt	1,5 Mt	1,5 Mt
	Biochar	0,8 Mt	0,4 Mt	0,4 Mt
Roches et minéraux	Altération accélérée	Calcaire : 5,2 Mt, Dolomie : 0,18 Mt, CKD : 0,12 Mt, Olivine : 0 Mt	Calcaire : 3,1 Mt, Dolomie : 0,09 Mt, CKD : 0 Mt, Olivine : 0 Mt	Calcaire : 3,1 Mt, Dolomie : 0,09 Mt, CKD : 0,12 Mt, Olivine : 0 Mt
	Alcalinisation minérale des océans			
Surfaces de forêts	Puits de carbone naturel forestier	19,8 Mha	17,8 Mha	17,8 Mha

Tableau 17 – Gisements théoriques maximums en ressources (partie 5) et utilisation des ressources (avec ou sans contrainte sur le stockage géologique de CO₂) dans le scénario de référence

10.6. Annexe : Concept de correspondance entre origine des émissions résiduelles et permanence de l'EDC utilisée pour les compenser (like-for-like)

La campagne "Race to Zero" de la CCNUCC définit les éliminations de CO₂ comparables (« like-for-like ») comme "lorsqu'une source d'émissions et un puits d'émissions correspondent en termes d'impact sur le réchauffement et en termes d'échelle de temps et de durabilité du stockage du carbone". Cette définition indique que le CO₂ provenant d'un stockage permanent, tel que les combustibles fossiles, doit être replacé dans un stockage permanent. Dans le même temps, le CO₂ libéré d'un stockage à faible permanence, tel que les forêts ou les sols, peut être réintégré dans le même type de stockage (c'est-à-dire compenser le changement d'affectation des terres par le reboisement). Cela signifie également que les gaz à effet de serre à courte durée de vie, tels que le méthane, pourraient être neutralisés par le stockage de CO₂ ayant la même durée de vie que le méthane (en ajustant les volumes pour tenir compte du potentiel de réchauffement planétaire). Le principe de l'équivalence découle de la structure du cycle naturel du carbone et permet d'éviter, par exemple, qu'une compagnie pétrolière continue à produire des combustibles fossiles et à libérer du CO₂ du cycle long du carbone, alors qu'elle compense ses émissions en plantant des arbres et en stockant le carbone dans le cycle court du carbone. Le principe du "like-for-like" devrait toujours être utilisé lors de la neutralisation des émissions résiduelles par des émissions négatives afin de contribuer à atteindre la neutralité carbone durable.

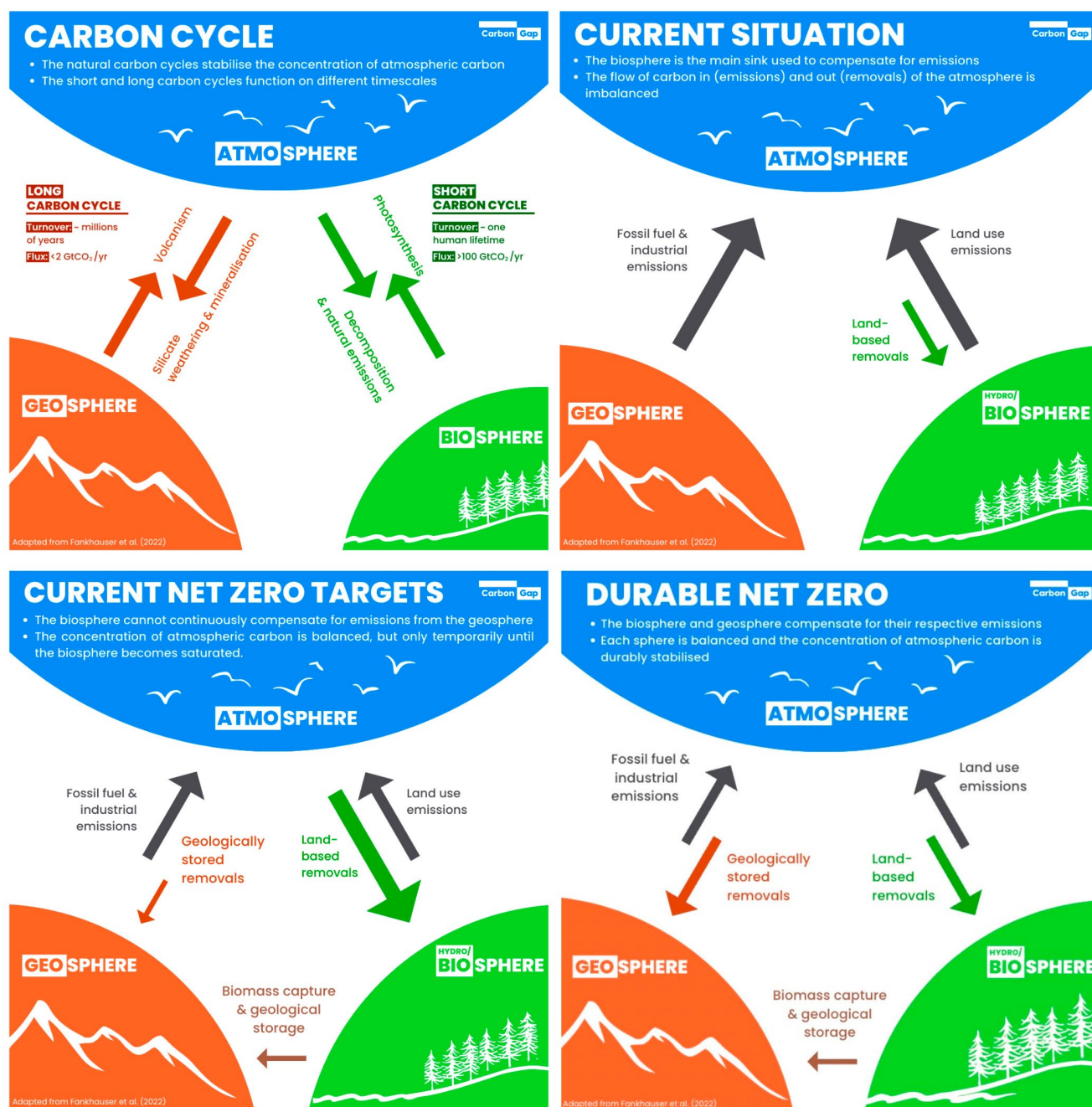


Figure 70 : illustration de la notion de like-for-like au travers de la comparaison de différents états d'équilibre des flux de carbones avec l'atmosphère.

10.7. Annexe : Facteurs de conversion pour les pratiques stockantes de l'INRAE

Les potentiels d'élimination de CO₂ des pratiques stockantes à l'hectare sont issus du rapport de l'INRAE « *Stocker du carbone dans les sols français* » (2020). Le rapport présente des estimations du bilan GES des pratiques stockantes sur l'ensemble du profil du sol. Ce bilan GES se compose de deux effets :

- Une diminution du CO₂ de l'atmosphère par élimination et stockage du carbone **dans les sols**
- Des effets **hors stockage du carbone dans les sols** comme les émissions d'autres molécules à effet de serre (azote et méthane), l'élimination du carbone dans la **biomasse** des arbres et des haies (et non les sols uniquement) et des **émissions indirectes** liées aux pratiques (réduction ou augmentation de l'utilisation d'engrais et d'herbicides)

Dans ce rapport, les valeurs de l'INRAE de potentiel d'élimination de CO₂ équivalent (bilan GES complet) ont été retenues car elles permettent de prendre en compte des effets importants comme le stockage du carbone dans la biomasse des arbres et des haies dans le cas des pratiques agroforesterie et plantation de haies. Elles permettent également d'écarter des pratiques stockantes qui stockent du carbone mais présentent un bilan GES positif (émetteur) comme la fertilisation azotée des prairies permanentes.

Pratiques stockantes	Stockage additionnel de C par ha d'assiette (sur tout le profil) (kgC/ha/an)	CO ₂ soustrait de l'atmosphère par stockage additionnel de C (sur tout le profil) (kgCO ₂ /ha/an)	Principaux autres postes d'émissions modifiés	CO ₂ soustrait de l'atmosphère par les modifications des autres postes d'émissions (kgCO _{2e} /ha/an)	CO ₂ soustrait de l'atmosphère tenant compte du bilan de GES complet (kgCO _{2e} /ha/an)
Extension des cultures intermédiaires	-215	-788	↗ CO ₂ carburants ↘ N ₂ O indirect	52	-736
Nouvelles ressources organiques*	-98	-359	↗ N ₂ O indirect (volatilisation, lixiviation) ↘ CO ₂ fabrication engrais N	35	-324
Insertion et allongement de prairies temporaires	-192	-703	↘ N ₂ O indirect (volatilisation, lixiviation) ↘ CO ₂ fabrication engrais N	-201	-903
Agroforesterie intraparcellaire	-391	-1 432	↗ Stockage C biomasse	-3 874	-5 306
Haies	-31	-115	↗ Stockage C biomasse	-1 121	-1 236
Intensification modérée des prairies permanentes	-213	-781	↗ N ₂ O direct et indirect ↗ CO ₂ fabrication engrais	791	10
Remplacement fauche pâture	-362	-1 328	↗ N ₂ O	343	-986
Enherbement permanent des vignobles	-464	-1 701		167	-1 534
Enherbement hivernal des vignobles	-300	-1 100		13	-1 087

Tableau 18 – Calcul du bilan GES des pratiques stockantes (sur l'ensemble du profil du sol) en 2020 selon l'INRAE

10.8. Annexe : Allocation de l'électricité dans le scénario ambition

Le gisement d'électricité disponible de 30 TWh du scénario **ambition** se répartit en ~2 TWh pour l'altération accélérée (Calcaire + Basalte), 3 TWh pour le S-DACCS (low temp), ce qui laisse 25 TWh pour le DACCS électrochimique.

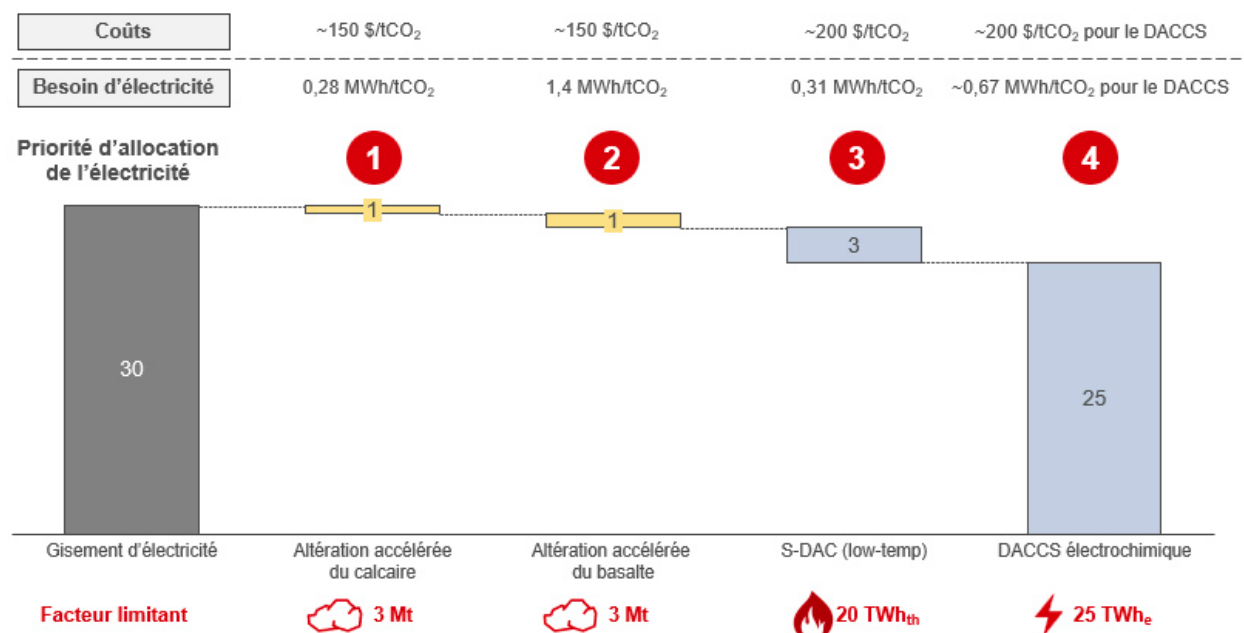


Figure 71 – Répartition du gisement d'électricité parmi les différentes méthodes d'EDC consommant de l'électricité dans le scénario ambition en 2050 [TWh/an]

10.9. Annexe : Besoin en CO₂ biogénique du maritime

Pour le maritime, le besoin en CO₂ biogénique pour la production de carburants durables a été estimé à 5,7 MtCO₂/an. Cette estimation provient des données de la feuille de route de décarbonation de la filière maritime (2022). Cette feuille de route présente sept scénarios de décarbonation du secteur maritime en France. Le scénario 3 appelé « S3 » est qualifié de « référence » dans cette feuille de route et a donc été retenu pour estimer le besoin en CO₂ biogénique.

Les volumes d'électro-carburants, d'e-ammoniac, d'hydrogène, de méthane et de méthanol ont été estimés à partir de leur part respective dans le mix énergétique du soutage des navires, sachant que le volume de soutage globale en 2050 du scénario S3 est de 46,4 TWh. Ces parts ont été obtenues par lecture graphique avec les éléments suivants.

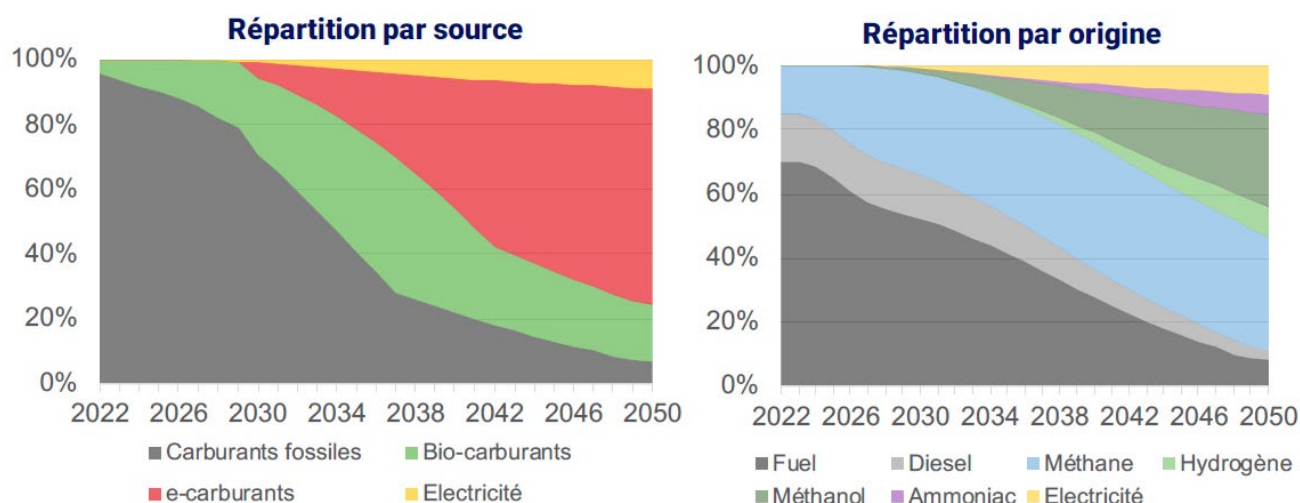


Figure 72 – Evolution du mix de carburants dans le scénario S3 de la feuille de route de décarbonation de la filière maritime

Dans le détail, la feuille de route estime dans le scénario de « référence » le besoin en électro-carburants en 2050 à ~32 TWh, dont ~24,6 TWh de e-méthane et e-méthanol et le reste d'hydrogène et d'e-ammoniac. La feuille de route ne précise pas directement le volume de e-méthane et d'e-méthanol donc une estimation a été réalisée à partir de la part de méthane et de méthanol dans le volume total estimé de ces carburants (GNL, bio et e-carburants).

Au total (GNL, bio et e-carburants), le volume de méthane et de méthanol représente ~29,7 TWh dont ~59% de méthane et ~41% de méthanol. En appliquant ce ratio au volume de e-méthane et e-méthanol (~24,6 TWh), le volume de e-méthane et e-méthanol est estimé à ~14,6 TWh et ~10 TWh resp.

Avec les facteurs de conversion 1 TWh = 85,9 ktep, méthane (0,84 tonne/tep) et méthanol (2,10 tonne/tep), et sachant que la production de e-méthane et e-méthanol requiert environ 3 et 1,4 tonnes de CO₂ par tonne de carburant respectivement selon le rapport de Concawe, le besoin en CO₂ biogénique est estimé à ~3,2 et ~2,5 MtCO₂/an pour l'e-méthane et l'e-méthanol resp., soit un total de ~5,7 MtCO₂/an (Concawe 2022).

10.10. Annexe : Volume de BECSC en 2050 dans le scénario ambition

Dans le **scénario ambition**, le potentiel de BECSC est de **18 MtCO₂/an** après déduction du besoin pour les électro-carburants mais avant la prise en compte des contraintes liées au stockage de CO₂ biogénique. Comme dans le scénario S4 de l'ADEME, il suppose un fort développement des infrastructures de transport et de stockage du CO₂ sur tout le territoire ainsi qu'une large utilisation de la biomasse pour l'énergie. Le besoin en CO₂ biogénique est toujours estimé à 7,4 MtCO₂/an pour l'aérien et 5,7 MtCO₂/an pour le maritime.

Cependant, à la différence du scénario S3 de l'ADEME, le scénario S4 de l'ADEME envisage un volume d'électricité de 18 TWh pour la production de carburants durables pour l'aérien en 2050. Cela correspond à un volume d'environ 1,5 Mt/an de CO₂ biogénique en 2050 qui est par conséquent **déjà vu** par l'ADEME.

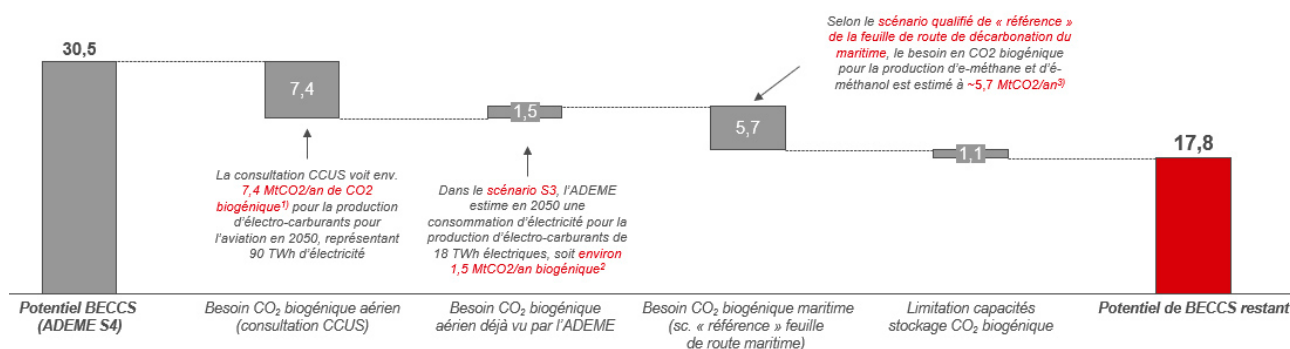


Figure 73 – Réduction du potentiel de BECCS de l'ADEME (S4) en prenant en compte la concurrence du CO₂ biogénique avec l'aérien et le maritime

10.11. Annexe : Coûts de capture pour les différentes méthodes d'EDC

Méthodes EDC	Unité	Valeur	Source
BECCS	€/tCO ₂	200	Valeur moyenne de state of CDR
Biochar	€/tCO ₂	200	Valeur moyenne de state of CDR
Produits biosourcés	€/tCO ₂	200	Valeur moyenne de state of CDR
Afforestation et Reforestation	€/tCO ₂	120	Valeur moyenne de state of CDR
Pratiques stockantes totales	€/tCO ₂	30 – 40 – 120	Selon le scénario retenu
Altération accélérée calcaire	€/tCO ₂	125	Valeur moyenne de state of CDR
DACCS Electrochimique	€/tCO ₂	200	Valeur moyenne de state of CDR
S-DACCS basse température	€/tCO ₂	200	Valeur moyenne de state of CDR

Tableau 19 – Coûts de capture à maturité pour les différentes méthodes d'EDC selon State of CDR (78)

A propos

The logo for Carbon Gap, featuring the word "Carbon" in black and "Gap" in white on a blue rectangular background.

Carbon Gap

Carbon Gap est une organisation non gouvernementale européenne à mission, indépendante et guidée par la science. Fondée en 2021, elle a pour double mission de :

- **Accélérer** le développement des capacités d'élimination du dioxyde de carbone atmosphérique en Europe
- **Surveiller** comment se fait le déploiement des méthodes d'EDC, pour assurer un bénéfice climatique maximal, une transparence complète, et que les garde fous nécessaires sont en place.

Carbon Gap travaille avec des scientifiques, des ONG, des décideurs, des investisseurs et des entrepreneurs pour catalyser l'émergence de filières d'EDC robustes permettant à l'Europe de sécuriser ses objectifs climatiques et de se projeter dès maintenant dans une phase nette négative, tout en créant de l'activité dans nos territoires.

En deux ans, Carbon Gap s'est positionnée comme une organisation de référence sur l'EDC en Europe, caractérisée par une vision à la fois pragmatique, constructive et inclusive pour développer l'ensemble des méthodes efficaces et sûres d'EDC.

Carbon Gap est le porteur de projet principal et coordinateur de ce rapport. L'équipe de Carbon Gap a conduit le projet, conçu la méthodologie, contribué aux analyses et à la rédaction du rapport.

www.carbongap.org



RMI

RMI est une organisation indépendante non gouvernementale, fondée en 1982 sous le nom de Rocky Mountain Institute, qui transforme les systèmes énergétiques mondiaux grâce à des solutions axées sur le marché pour s'aligner sur un avenir à 1,5°C et garantir un avenir propre, prospère et neutre en carbone pour tous. Nous travaillons dans les zones géographiques les plus stratégiques du monde et travaillons avec les entreprises, les décideurs politiques, les communautés et les organisations non gouvernementales pour identifier et généraliser les interventions sur le système énergétique qui réduiront les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 50 % d'ici 2030. RMI a des bureaux à Basalt et Boulder, Colorado ; New York; Oakland, Californie; Washington DC.; et Pékin.

RMI a contribué à la compilation de la base de données sur les besoins en ressources des méthodes d'EDC et à l'analyse pour l'allocation des ressources disponibles.

www.rmi.org



E-CUBE

E-CUBE Strategy Consultants est le cabinet de conseil en stratégie dédié aux enjeux énergie, mobilité et climat. Fondé en 2008 et comptant une cinquantaine de consultants, le cabinet se situe au cœur des enjeux de transition énergétique et de développement durable. Fort de son engagement, E-CUBE a établi des partenariats fructueux avec plus de 300 clients, concrétisant son expertise à travers la réalisation de plus de 800 projets à ce jour.

Les travaux d'E-CUBE couvrent l'ensemble des problématiques de Directions Générales : analyse stratégique, stratégie « données », stratégie de décarbonation et impact sur les modèles d'affaires, redéfinition des stratégies d'approvisionnement énergétique, études réglementaires et technico-économique, évolution des organisations ou amélioration de la performance opérationnelle. Les interventions d'E-CUBE s'organisent autour de trois axes :

- **Energie et Environnement** : accompagner les énergéticiens (électriciens et gaziers, compagnies pétrolières, acteurs des filières énergies renouvelables) dans l'anticipation et la prise en compte de l'évolution de leur environnement marché, réglementaire, concurrentiel et technologique. Assister les acteurs privés et publics dans la réévaluation de leur stratégie afin d'intégrer les enjeux et les opportunités d'une « nouvelle donne » énergétique et environnementale.
- **Mobilité** : accompagner les acteurs de l'automobile, du ferroviaire, du transport aérien, du shipping et de la logistique dans le cadre de leurs projets stratégiques, réglementaires et opérationnels. Accompagner les leaders de l'industrie dans la réévaluation de leur stratégie afin d'intégrer les enjeux du digital et les opportunités d'une « nouvelle donne » énergétique et environnementale.
- **Décarbonation** : accompagner les acteurs industriels et tertiaire dans la compréhension des impacts sur leurs activités et leurs modèles d'affaires de la transition énergétique et environnementale, appuyer et challenger leur stratégie de décarbonation, les aider dans la refonte des stratégies d'approvisionnement énergétique et de logistique.

E-CUBE a réalisé la recherche et l'analyse de données, a conduit les entretiens auprès des parties prenantes, a rédigé le rapport et a conduit l'atelier de conception de la feuille de route.

www.e-cube.com