

# Captage, usage et stockage du carbone : une industrie en devenir ?



**MÉTROPOLE**

**GRAND LYON**

Le captage, l'utilisation et le stockage du carbone s'imposent comme un levier incontournable des scénarios de neutralité carbone. Le consensus scientifique est sans ambiguïté : même avec une réduction maximale des émissions, des volumes considérables de CO<sub>2</sub> devront être captés pour compenser les émissions industrielles incompressibles et retirer les excès accumulés dans l'atmosphère afin de contenir le réchauffement à 1,5°C.

Or l'écart entre les besoins identifiés par le GIEC et les capacités aujourd'hui opérationnelles reste abyssal, tant du côté des technologies de captage industriel que des méthodes d'élimination du CO<sub>2</sub> atmosphérique.

Parallèlement à ce défi de déploiement, une question encore peu médiatisée mérite attention : le CO<sub>2</sub> capté peut-il devenir une matière première industrielle à part entière ?

Des carburants de synthèse aux matériaux de construction, de la chimie verte aux nanomatériaux de haute technologie, cette note explore les contours d'une filière émergente qui pourrait transformer un déchet climatique en ressource économique.



Avril 2026 / Métropole de Lyon

**Coordination**

Direction de la Prospective et du Dialogue Public (DPDP)

**Rédaction**

Boris Chabanel, membre du réseau de veille de la DPDP

**Réalisation**

DPDP

*Illustration de couverture ©AdobeStock " Industrie business cheminée usine fumée co<sub>2</sub> carbone environnement".*

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	4
▶ Pourquoi capter du carbone est indispensable pour atteindre la neutralité carbone et compenser un probable dépassement de température ? .....	5
▶ Puits de carbone, CCUS, CDR... comment capter le CO <sub>2</sub> ? .....	5
▶ Stockage ou usage, que faire du CO <sub>2</sub> capté ? .....	7
▶ Le risque d'un déploiement insuffisant des technologies CCUS et CDR ....	8
▶ Usages industriels du CO <sub>2</sub> capté : quels enjeux ?.....	9
▶ ...pour quels potentiels de développement ? .....	10
<b>Conclusion</b> .....	14
<b>Ressources bibliographiques</b> .....	15

## Introduction

Atteindre la neutralité carbone d'ici le milieu du siècle impose une équation simple : réduire massivement les émissions de gaz à effet de serre et compenser celles qui demeurent incompressibles. Or, si les puits de carbone naturels (océans, forêts...) absorbent aujourd'hui environ 55% des émissions anthropiques globales, cette capacité s'érode : en France par exemple, le puit forestier national a été divisée par deux au cours de la période 2015-2023 par rapport à la décennie précédente.

Dans ce contexte, le recours aux technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone devient un pivot des scénarios climatiques afin de disposer de capacités additionnelles d'élimination des gaz à effet de serre. Celles-ci consistent capturer le CO<sub>2</sub> émis par les industries générant de fortes émissions résiduelles ou retirer celui déjà présent dans l'atmosphère, dans le but de le stocker durablement ou de le réutiliser comme intrants dans la fabrication de certains produits en substitution de consommations fossiles.

Le déploiement de ces technologies soulève cependant de vifs débats. Si certaines analyses soulignent le risque que le captage du carbone serve de prétexte à retarder la sortie des combustibles fossiles, d'autres attirent l'attention sur l'écart important entre le rôle qui est assigné à ces technologies dans les scénarios climatiques et ce que la réalité technico-économique permet d'envisager à grande échelle.

Cet article propose un tour d'horizon de ces questions, en portant une attention particulière sur un pan encore peu médiatisé : les potentiels liés à l'utilisation du carbone. Parallèlement au grand chantier de la «décarbonation de l'industrie», voit-on émerger une «industrie de la décarbonation» fondée sur le développement de l'utilisation du carbone issu du captage ?

# Pourquoi capter du carbone est indispensable pour atteindre la neutralité carbone et compenser un probable dépassement de température ?

Le consensus scientifique, porté par le GIEC, est désormais clair : l'atteinte de la neutralité carbone d'ici le milieu du siècle et l'ambition de limiter le réchauffement à 1,5°C, ne pourront reposer uniquement sur la réduction des émissions. Le déploiement massif de technologies de captage et d'élimination du carbone est devenu une variable incontournable des scénarios climatiques pour traiter deux types de flux (de Rochette et al., 2022) :

- ▶ **les émissions résiduelles** : il s'agit des émissions jugées incompressibles à terme même avec une sortie totale des énergies fossiles, une efficacité énergétique maximale et une sobriété accrue des modes de production et de consommation. Provenant majoritairement de procédés chimiques industriels (fabrication de ciment et de chaux par exemple) ou de l'agriculture (émissions de méthane de l'élevage et de protoxyde d'azote lié à l'épandage d'engrais), ces émissions résiduelles doivent nécessairement être compensées soit par une captation à la source, soit par un retrait équivalent dans l'atmosphère, pour atteindre la neutralité climatique.

- ▶ **les émissions en excès** : elles renvoient quant à elles au fait que la quasi-totalité des scénarios limitant le réchauffement à 1,5°C d'ici 2100 prévoient un dépassement temporaire de ce seuil de réchauffement. Il est en effet extrêmement probable que les émissions cumulées de dioxyde de carbone excéderont la quantité à ne pas dépasser pour limiter le réchauffement à 1,5°C. Dans ce cas de figure, atteindre la neutralité carbone ne suffit pas : pour mettre fin à au dépassement (overshoot en anglais), il devient nécessaire de retirer les émissions en excès dans l'atmosphère. On parle ici d'«émissions négatives».

## Puits de carbone, CCUS, CDR... comment capter le CO<sub>2</sub> ?

Première étape de la chaîne, le captage du dioxyde de carbone renvoie à plusieurs notions. Au niveau le plus général, les « puits de carbone » recouvrent l'ensemble des processus, activités ou mécanismes capables d'éliminer de l'atmosphère du dioxyde de carbone et de le stocker durablement. On distingue ainsi les puits naturels (océans, forêts, sols, zones humides) et les puits technologiques (mis en œuvre par les activités humaines), en sachant que ces derniers peuvent s'appuyer sur les processus naturels (par exemple, les activités de reforestation).

S'agissant des puits technologiques, les scénarios climatiques distinguent deux grandes approches (Smith et al., 2024).

- ▶ **Le captage, utilisation et stockage du Carbone** (*Carbon Capture, Utilization and Storage* en anglais / CCUS en anglais) : le captage concerne ici le dioxyde de carbone issu de sources d'émissions concentrées liées aux procédés industriels (cimenterie, aciérie, centrales électriques fossiles, usines chimiques...). Lorsqu'il est stocké à long terme dans des réservoirs géologiques à l'abri de l'atmosphère, ou utilisé dans des produits à longue durée de vie (matériaux de construction par exemple), le carbone capté permet d'éviter de nouvelles émissions et donc de réduire les émissions nettes et de contribuer à terme à l'atteinte de la neutralité carbone.

## Panorama des principales technologies de captage CCUS

Les technologies CCUS reposent sur trois principaux procédés de captage des émissions concentrées des sites industriels (Commission de Régulation de l'Énergie, 2024) :

- **Le captage post-combustion** : technique de captage la plus communément utilisée à l'heure actuelle, elle consiste à séparer le CO<sub>2</sub> des fumées de combustion par des procédés physico-chimiques.
- **Le captage pré-combustion** : visant à extraire le CO<sub>2</sub> à la source avant usage, il consiste à transformer le combustible fossile en un gaz de synthèse, puis en un mélange de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène, pouvant ensuite être séparés. Le dioxyde de carbone peut alors être capté à ce stade, pour ne brûler que l'hydrogène (qui ne rejette que de la vapeur d'eau).
- **L'oxy-combustion** : procédé consistant à réaliser une combustion en présence d'oxygène pur au lieu d'air, ce qui permet d'obtenir des fumées plus concentrées en dioxyde de carbone (à hauteur de 90%), facilitant ainsi son captage.

- ▶ **L'élimination du dioxyde de carbone** (*Carbon Dioxide Removal/CDR* en anglais) : elle recouvre les activités qui permettent de retirer le dioxyde de carbone déjà présent dans l'atmosphère et de le stocker à long terme dans des puits biologiques (forêts, sols, zones humides...), des réservoirs géologiques analogues à ceux mobilisés pour le CCUS ou des produits à l'instar du CCUS.

## Panorama des principales technologies de captage CDR

On distingue quatre grandes familles de technologies (Smith et al., 2024 ; Pont, 2024) :

- **Les solutions fondées sur la nature** : la reforestation (replanter des arbres sur une zone qui était déjà forestière mais a été déboisée) et l'afforestation (établir une forêt sur des terres qui n'ont jamais été boisées dans l'histoire récente) s'appuient sur le principe de la photosynthèse qui permet aux végétaux d'absorber le CO<sub>2</sub> atmosphérique et de le transformer en biomasse. La restauration des zones humides (tourbières, marais...) permet quant à elle de séquestrer du carbone en bloquant la décomposition de la biomasse par saturation en eau (anaérobiose). L'amélioration des sols (terres cultivées et prairies) renforce l'accumulation de matière organique stable protégée au sein des agrégats terreux.
- **Le captage direct du CO<sub>2</sub> dans l'air** (*Direct Air Carbon Capture and Storage / DACCS* en anglais) : procédé industriel qui utilise des systèmes de filtration de l'air par solvants liquides ou matériaux solides pour extraire directement le dioxyde de carbone de l'air ambiant en vue d'un stockage durable.
- **La bioénergie avec captage du CO<sub>2</sub>** (*Bioenergy with Carbon Capture and Storage / BECCS*) : processus consistant à produire de l'énergie à partir de biomasse (qui a naturellement capté du CO<sub>2</sub> en poussant) tout en captant les émissions résultantes en vue d'un stockage durable.
- **La carbonatation minérale** (ou minéralisation du CO<sub>2</sub>) : procédé chimique qui pétrifie le CO<sub>2</sub> en le transformant en minéraux solides (carbonates) au contact de roches ou de déchets riches en calcium et magnésium. À l'instar du stockage géologique, c'est une méthode de stockage plus stable et permanente, car elle imite le cycle géologique naturel pour verrouiller le carbone dans la pierre pendant des millénaires.

Bien que les notions de CCUS et de CDR semblent proches, elles se distinguent dans leur contribution à l'atténuation du changement climatique (Smith et al., 2024 ; Carbon Gap, 2022).

En résumé, si le CCUS apparaît indispensable pour neutraliser les secteurs les plus difficiles à décarboner («hard-to-abate» en anglais), le déploiement des technologies CDR constitue le principal levier pour traiter les gaz à effet de serre en excès dans l'atmosphère pour limiter le réchauffement à 1,5 ou 2°C.

# Stockage ou usage, que faire du CO<sub>2</sub> capté ?

La distinction entre technologies CCUS et CDR est plus complexe concernant la destination du carbone capté. Elles ont en commun deux destinations possibles (Smith et al., 2024) :

- ▶ **Le recours au stockage géologique** : injection du CO<sub>2</sub> capté dans des formations souterraines profondes et étanches, telles que des aquifères salins ou des gisements d'hydrocarbures épuisés.
- ▶ **L'utilisation du CO<sub>2</sub> comme matière première dans divers produits** : matériaux de construction, carburants de synthèse...

Le CDR recouvre également d'autres modalités de stockage. Si le stockage peut être intrinsèque au captage, comme pour les solutions fondées sur la nature (forêt, sols, milieux humides) ou la carbonatation minérale, d'autres options de stockage complémentaires sont à mentionner (Smith et al., 2024) :

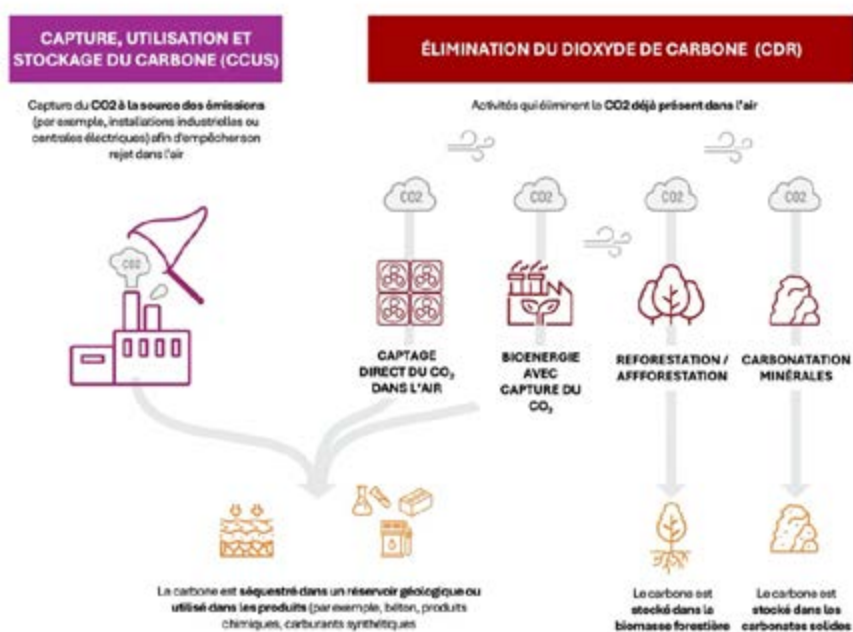
- ▶ **Les matériaux de construction biosourcés** : les matériaux fabriqués à partir de la récolte de biomasse constituent également une modalité de stockage à long terme.
- ▶ **Le biochar** : il s'agit d'un charbon végétal obtenu par pyrolyse de résidus de biomasse, dont la structure moléculaire très stable empêche la décomposition du carbone capté par les plantes. Incorporé aux sols, il agit comme un puits de carbone permanent pendant des siècles tout en améliorant la fertilité et la rétention d'eau des terres agricoles.

Toutefois, il est important de souligner que toutes ces options ne se valent pas du point de vue de l'atténuation du changement climatique. La valeur climatique d'une technologie dépend du critère de permanence du stockage (Smith et al., 2024) : quelle durée de séquestration du carbone et quel risque de ré-émission ?

De ce point de vue, le stockage géologique et la carbonatation minérale offrent les durées de stockage les plus longues et sont les moins exposées au risque de réversibilité face aux perturbations humaines ou climatiques. Le carbone séquestré dans les puits biologiques (forêts, zones humides, sols) est considéré en revanche comme plus vulnérable : il peut être relâché rapidement dans l'atmosphère en cas d'incendie, de maladie des forêts, de drainage des zones humides ou de retour au labour. Enfin, l'utilisation du carbone dans des produits à faible durée de vie présente par définition une forte réversibilité (par exemple, l'usage dans les boissons gazeuses).

C'est pourquoi, les travaux du GIEC excluent de la notion de CDR les usages du carbone capté concernant des produits à faible durée de vie. Notons néanmoins qu'il n'existe actuellement ni base scientifique claire ni consensus parmi les décideurs politiques quant au seuil de durée de stockage à inclure dans la définition du CDR.

## Différencier captage et élimination du carbone



Source : World Resources Institute

# Le risque d'un déploiement insuffisant des technologies CCUS et CDR

Si les technologies de gestion du carbone sont jugées indispensables par le GIEC pour compenser les émissions résiduelles et en excès, encore faut-il être en mesure de les déployer à la bonne échelle.

Tout d'abord, quels volumes de carbone est-il nécessaire de capter ? Le dernier rapport du GIEC portant sur l'atténuation du changement climatique indique que, dans les scénarios atteignant la neutralité carbone à l'échelle mondiale, le volume de CO<sub>2</sub> capté pour compenser les émissions résiduelles se situe entre 5 et 16 milliards de tonnes par an au moment où la neutralité est atteinte (IPCC, 2022). Pour donner un ordre de grandeur, les émissions mondiales de gaz à effet de serre ont atteint en 2024 environ 53,2 milliards de tonnes en équivalents CO<sub>2</sub>, dont 40 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> (JRC, 2025). Concernant les émissions en excès, le GIEC prévoit des émissions négatives cumulées de CO<sub>2</sub> d'environ 360 milliards de tonnes entre le moment où la neutralité carbone est atteinte et 2100, avec une fourchette allant de 60 à 380 milliards de tonnes. Petite subtilité, ces émissions négatives compensent à la fois les émissions en excès mais également les émissions résiduelles des autres gaz à effet de serre (méthane, protoxyde d'azote...). Une étude récente (Lura et al., 2025) va plus loin en soulignant la nécessité, une fois la neutralité carbone atteinte, de revenir en dessous niveau de concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de 350 ppm, considéré comme le seuil à ne pas dépasser pour garantir la stabilité du climat à long terme. Cela signifie que toutes les émissions de CO<sub>2</sub> cumulées depuis 1988 (année où le seuil de 350 ppm a été dépassé) devront être extraites de l'atmosphère, soit 1500 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> dans le meilleur des cas.

Les volumes actuels de captage de CO<sub>2</sub> montrent qu'il y a loin de la coupe aux lèvres. Les capacités CCUS opérationnelles restent faibles. En juillet 2025, on dénombre 77 installations commerciales en opération dans le monde, pour une capacité de captage de 64 millions de tonnes par an (Global CCS Institute, 2025). Côté CDR, environ 2,2 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> sont retirées de l'atmosphère chaque année, à plus de 99,9% par la reforestation et la gestion des forêts (Smith et al., 2024). La Chine, l'UE27 et les États-Unis représentent 44% du CDR forestier mondial total. Les méthodes technologiques (DACCS, BECCS, biochar) quant à elles ne contribuent qu'à hauteur de 1,35 million de tonnes de CO<sub>2</sub> par an en 2023 (Smith et al., 2024).

De plus, seuls 40 pays ont intégré le captage du carbone dans leurs engagements climatiques et leurs objectifs cumulés prévoient une augmentation de seulement 0,5 milliard de tonnes par an d'ici 2030 et de 1,9 d'ici 2050 (Lamb et al., 2024). La grande majorité de ces annonces repose sur les solutions fondées sur la nature (forêts, sols), tandis que les engagements concernant les solutions technologiques (DACCS, BECCS) sont quasi nuls pour 2030.

Les doutes sur la capacité à changer de braquet dans les années et décennies à venir semblent d'autant plus justifiés que les technologies CCUS et CDR présentent des maturités technologiques variables et des contraintes spécifiques qui conditionnent leur déploiement (Ademe, 2021 ; de Rochette et al., 2022 ; Haut Conseil pour le Climat, 2023 ; IEA, 2023 ; Commission de Régulation de l'Énergie, 2024 ; Gidden et al., 2025 ; JRC, 2024 ; Ministère de l'économie, 2024 ; Smith et al., 2024 ; European Scientific Advisory Board on Climate Change, 2025 ; Lura et al., 2025 ; World Economic Forum, 2026).

- **Une maturité technologique hétérogène :** Plusieurs solutions apparaissent d'ores et déjà matures et présentent une capacité de déploiement rapide : captage post-combustion, solutions fondées sur la nature (reforestation, afforestation, amélioration des sols, restauration des zones humides continentales), carbonatation minérale appliquée au durcissement du béton. D'autres solutions sont en phase de démonstration, avec des installations pilotes opérationnelles mais nécessitant de lever des freins au passage à l'échelle industrielle : captage oxy-combustion, captage pré-combustion, restauration des zones humides, biochar, bioénergie avec captage et stockage (BECCS), captage direct dans l'air (DACCS). Enfin d'autres solutions restent encore émergentes comme la carbonatation minérale reposant l'altération forcée des roches (méthode consistant à répandre des minéraux broyés tels que le basalte sur des sols agricoles pour accélérer la capture naturelle du CO<sub>2</sub>).
- **La « pénalité énergétique » et le défi des coûts :** Le principal verrou technique réside dans la consommation d'énergie nécessaire pour séparer et concentrer le CO<sub>2</sub>. En effet, plus la source est diluée et plus l'effort énergétique est intense. Le DACCS est ainsi 10 fois plus énergivore que le captage sur une fumée industrielle concentrée. On constate ainsi une large disparité de coûts. Si la reforestation/afforestation coûte entre 0 et 240 € par tonne de CO<sub>2</sub> captée, les solutions technologiques comme le DACCS affichent aujourd'hui des coûts s'échelonnant entre 200 et 1000 €.

► **Les contraintes d'infrastructure et de ressources** : Le passage à l'échelle industrielle exige la création d'infrastructures de transport et de conditionnement (canalisations, terminaux portuaires pour navires) pour acheminer le CO<sub>2</sub> des sites où il est capté vers les sites de stockage géologique profonds. Par ailleurs, le BECCS et la reforestation massive entrent en compétition avec la production alimentaire et la préservation de la biodiversité pour l'usage des terres. S'ajoutent à cela les besoins additionnels en ressource en eau et en intrants chimiques pour la capture du CO<sub>2</sub> sur sites industriels.

► **Des capacités de stockage qui ne sont pas sans limites** : Une étude récente définit une « limite planétaire prudente » d'environ 1460 milliards de tonnes de stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Calculée en excluant les zones à risques (séismes, zones protégées, proximité des populations) et

les profondeurs inadaptées, cette limite suggère que la plupart des scénarios climatiques pourraient épuiser les sites les plus sûrs et économiques avant 2125. De même, le développement des puits de carbone naturels reste limité à long terme par la disponibilité des terres, des nutriments et de l'eau, ainsi que par la dynamique de croissance inhérente aux systèmes biologiques.

Dans ce contexte, un récent rapport du Haut Conseil pour le Climat préconise de réserver le recours aux technologies CCUS aux sites industriels fortement émetteurs pour lesquels les alternatives décarbonées (électrification, efficacité énergétique...) sont inexistantes à ce jour ou limitées (Haut Conseil pour le Climat, 2023). Il appelle également à ne pas compter de manière excessive sur les émissions négatives générées par le CDR pour contrebalancer le dépassement (probable) des budgets d'émissions compatibles avec les objectifs de l'accord de Paris.

### **Le captage de CO<sub>2</sub> dans la nouvelle Stratégie Nationale Bas Carbone (Gouvernement, 2025)**

Le scénario de référence de la Stratégie Nationale Bas Carbone n°3 prévoit le recours aux technologies de captage du CO<sub>2</sub> dans sa trajectoire d'atteinte de la neutralité carbone en 2050, en tenant compte d'une double contrainte : dégradation des puits naturels et puits technologiques limités. Les absorptions naturelles pourraient permettre de capter environ 40 Mt CO<sub>2</sub>e/an en 2050 dans le scénario central, et les puits technologiques environ 20 Mt CO<sub>2</sub>e/an, par la capture d'émissions issues de la biomasse (BECCS) ou par la capture directe de CO<sub>2</sub> dans l'air (DACCS). La SNBC reprend également les objectifs de la stratégie nationale CCUS : capter 4 à 8 Mt CO<sub>2</sub>e par an dans l'industrie à horizon 2030, et capter entre 20 et 30 Mt CO<sub>2</sub>e par an dans l'industrie à horizon 2050.

## **Usages industriels du CO<sub>2</sub> capté : quels enjeux ?...**

À la différence du stockage dans les réservoirs géologiques ou les puits naturels (forêts, zones humides, sols...) qui vise une élimination de long terme, le CO<sub>2</sub> capté peut également faire l'objet d'une valorisation économique comme une matière première pour fabriquer des produits et fournir des services industriels.

Le captage et l'utilisation du carbone (CCU) s'inscrit ainsi dans une logique d'« économie circulaire » du carbone permettant une « défossilisation » de l'économie : substituer le carbone d'origine fossile par du carbone capté (et donc recyclé) dans les activités économiques qui utilisent cette matière première. Théoriquement, la valorisation permet de réduire par 2 les émissions de CO<sub>2</sub>, en générant une seule émission pour un double usage (Ademe, 2021). Toutefois, le volume de CO<sub>2</sub> capté et réutilisé dans un procédé de valorisation du CO<sub>2</sub> ne correspond pas à une réduction nette d'émissions de CO<sub>2</sub>, puisqu'il faut tenir compte des émissions induites par le captage et la purification du CO<sub>2</sub> ainsi que celles liées au procédé de transformation de ce CO<sub>2</sub>.

De plus, selon le produit dans lequel il est utilisé, le CO<sub>2</sub> sera dans la majorité des cas réémis, et ce plus ou moins rapidement. C'est pourquoi, en l'absence d'un cadre de comptabilité carbone clair, la contribution globale de la valorisation du CO<sub>2</sub> en termes de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> reste difficile à quantifier en raison de nombreux paramètres et de volumes potentiels différant grandement d'une voie de valorisation à l'autre (Ademe, 2021 ; Haut Conseil pour le Climat, 2023).

Deux arguments importants en faveur de la valorisation du CO<sub>2</sub> sont à mentionner. Le premier est que la décarbonation du mix énergétique et des modes de production ne peut être totale à terme. Il demeure des usages pour lesquels le recours au carbone resterait indispensable (Lange, 2026). Utilisant de grandes quantités d'énergie sous une forme très compacte, les transports lourds – aviation, transport maritime, camions longue distance, engins tout-terrain... – continueront probablement à utiliser des carburants à base de carbone qui ne souffrent pas de la faible densité énergétique des batteries électriques –

inférieure d'un facteur d'environ 50 à celle des carburants fossiles – ou des inconvénients de l'hydrogène – difficulté de stockage et de transport, nécessité de développer de nouvelles infrastructures. De même, dans l'industrie chimique, de nombreux intermédiaires (méthanol, éthylène, propylène) nécessaires à la fabrication de multiples produits (plastiques, fibres, solvants...) sont historiquement synthétisés à partir d'hydrocarbures fossiles. Réduire leur empreinte carbone peut passer par le développement de la chimie biosourcée et de l'utilisation des matières recyclées, mais la valorisation chimique du CO<sub>2</sub> suscite une attention particulière car elle pourrait permettre d'adapter les procédés actuels – en particulier dans la chimie organique de base – sans nécessité de les changer (Ademe, 2021).

Le second argument est que le développement de la valorisation du carbone en aval peut constituer un levier du développement des technologies de captage du carbone en amont (World Economic Forum, 2025 ; Lura et al., 2025). Le captage du carbone, pris isolément, représente généralement un coût supplémentaire pour la production conventionnelle. En revanche, en permettant de convertir le carbone capté en matières ayant une valeur ajoutée économique, les filières de valorisation peuvent permettre de compenser ces coûts supplémentaires en générant une source de revenus additionnelle.

## ...pour quels potentiels de développement ?

Quel est le marché actuel des usages industriels du CO<sub>2</sub> ? Hors production de carburants fossiles, il représente environ 230 millions de tonnes par an à l'échelle mondiale (Ademe, 2021). Ce volume est absorbé historiquement par deux secteurs principaux : la production d'urée (nécessaire à la fabrication d'engrais azotés) et la récupération assistée du pétrole (où le gaz est injecté dans des gisements en fin de vie pour en extraire les hydrocarbures résiduels). À l'échelle de la France, le marché représente une consommation annuelle d'environ 0,8 Mt/an. Il est très spécifique : l'industrie agro-alimentaire représente 70% des usages (boissons gazeuses,

conservation sous atmosphère protectrice, étourdissement du bétail...). Le reste est utilisé pour le traitement des eaux ou comme fluide réfrigérant. Actuellement, la France est quasi-autosuffisante pour ses besoins grâce aux coproduits de la fabrication d'ammoniac et du raffinage.

Si l'industrie du carbone reste aujourd'hui un marché de niche à l'échelle climatique, pourrait-elle changer de dimension à l'avenir ?

Trois principaux marchés ouvrent des perspectives de développement importantes :

### ► Les carburants de synthèse (e-fuels)

Comme mentionné précédemment, la fabrication de carburants de synthèse pour les transports lourds peut constituer un marché significatif à l'avenir. L'UE a d'ailleurs adopté deux règlements (RefuelUE et FuelUE) fixant des objectifs ambitieux concernant l'utilisation d'e-fuels dans l'aviation et le maritime. La fabrication de kérosène ou de méthanol de synthèse repose sur la combinaison de CO<sub>2</sub> capté avec de l'hydrogène (Ademe, 2021). On parle ainsi d'électrocarburants (e-fuels) car ceux-ci sont fabriqués en utilisant de l'électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, permettant ainsi de stocker cette énergie électrique dans les liaisons chimiques des carburants. Le potentiel mondial de valorisation de CO<sub>2</sub> pour 2040 est estimé entre 50 et 150 millions de tonnes par an pour l'e-kérosène et entre 130 et 280 millions de tonnes pour l'e-méthanol (Oil and Gas Climate Initiative, 2024).

Le déploiement industriel des carburants de synthèse bute cependant sur les conditions à réunir pour garantir un impact positif sur le climat. En effet, le carbone utilisé pour leur fabrication n'est stocké que brièvement avant d'être réémis lors de leur usage. Pour que la production d'e-kérosène ou d'e-méthanol se rapproche de la neutralité carbone (Oil and Gas Climate Initiative, 2024), il est nécessaire d'une part de disposer de quantités très importantes d'électricité bas carbone (renouvelable ou nucléaire) pour produire de l'hydrogène par électrolyse ; sans oublier la « pénalité énergétique » liée aux procédés de captage du CO<sub>2</sub> évoquée plus haut.

La neutralité suppose également que le CO<sub>2</sub> valorisé soit issu non pas du « CO<sub>2</sub> fossile » (capté sur les installations industrielles de combustion de matière première fossile) mais du « CO<sub>2</sub> atmosphérique » (retiré de l'atmosphère par captage direct) ou du « CO<sub>2</sub> biogénique » (issu de la méthanisation ou de la combustion de biomasse) ; ces deux dernières sources étant pour l'instant limitées.

En effet, lorsqu'on utilise du CO<sub>2</sub> capté sur des installations industrielles brûlant des combustibles fossiles, on ne fait que recycler temporairement du carbone fossile extrait du sous-sol, qui aboutit *in fine* à un ajout net de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

n revanche, le carbone atmosphérique et biogénique sont retirés de l'atmosphère, ce qui permet d'assurer la neutralité du carbone ré-émis lors de la combustion des carburants de synthèse.

### ► Les produits chimiques

Le CO<sub>2</sub> capté peut être utilisé en substitution des hydrocarbures fossiles comme matière première pour produire un certain nombre de produits chimiques, qui peuvent ensuite être transformés en produits plus complexes (Ademe, 2021 ; Ministère de l'Économie, 2024). Un grand spectre de molécules peut être obtenu via des procédés présentant différents niveaux de maturité (voir tableau ci-dessous).

Le développement de ces applications bute là aussi sur une forte pénalité énergétique. À celle liée à l'étape amont du captage s'ajoute celle induite par les procédés valorisation (Ademe, 2021). En effet, d'un point de vue thermodynamique, le CO<sub>2</sub> est une molécule très peu réactive. Sa transformation chimique en d'autres molécules plus complexes est donc fortement consommatrice d'énergie, de manière variable en fonction des différents produits synthétisés.

Cette consommation énergétique est cependant réduite dans le cas des procédés de valorisation biologique du CO<sub>2</sub> où la réaction est assurée par des micro-organismes qui utilisent le CO<sub>2</sub> comme apport nutritif. Ces procédés biologiques font l'objet de nombreuses recherches (fermentation enzymatique, production de microalgues, ...). Qui plus est, en fonction des technologies développées, le CO<sub>2</sub> doit être purifié jusqu'au grade alimentaire, impératif ayant un impact important sur le coût final du CO<sub>2</sub>.

À noter que la substitution des carburants synthétiques aux carburants fossiles ne réduit pas les autres impacts environnementaux liés aux moteurs thermiques comme les émissions de particules fines. Enfin, les e-fuels peinent à démontrer leur compétitivité économique : ils sont actuellement 2 à 10 fois plus chers que les carburants fossiles (Ademe, 2021).

Au total, force est de constater que les produits issus de la valorisation chimique du CO<sub>2</sub> présentent aux aussi des coûts de production bien supérieurs à ceux de leurs équivalents fossiles (Ademe, 2021).

Mais la valorisation du CO<sub>2</sub> débouche aussi sur le développement des matériaux à haute valeur ajoutée – tels que le graphite synthétique, le graphène ou les nanotubes de carbone – qui trouvent des débouchés dans les filières de pointe malgré des coûts de production élevés (Ademe, 2021 ; World Economic Forum, 2025). Ces matériaux trouvent leur application pivot dans la filière des batteries pour véhicules électriques. L'enjeu est aussi géopolitique car la quasi-totalité du graphite synthétique mondial est produit en Chine.

## Panorama des produits issus de la valorisation du CO<sub>2</sub>

Sources : LeClerc et al. (2025), Masoumilari et al. (2026), Ramirez-Corredores (2024)

Produits	Stade de développement	Principales applications
Urée	Commercial mature	Engrais azotés (80 % du marché), résines...
Méthanol	Commercial en accélération	Précurseur du formaldéhyde, de l'acide acétique, des oléfines légères ; carburant...
Polycarbonates	Commercial	Films d'emballage, lunettes, vitrages automobiles, mousses de polyuréthane...
Carbonate de diméthyle	Commercial / démonstration avancée	Solvant, électrolyte de batteries lithium-ion, précurseur du diphenyle carbonate et des polycarbonates...
Carbonates cycliques	Démonstration / commercial	Électrolytes de batteries lithium-ion, intermédiaires de synthèse pour polymères et produits pharmaceutiques...
Acide formique	Démonstration	Conservateur alimentaire et vétérinaire, traitement des textiles, vecteur d'hydrogène pour piles à combustible...
Éthanol	Démonstration / commercial	Carburant, solvant industriel et pharmaceutique, précurseur de l'acétaldéhyde et de l'acide acétique...
Syngaz (CO + H <sub>2</sub> )	Démonstration / pré-commercial	Précurseur de la synthèse Fischer-Tropsch (carburants, lubrifiants), production de méthanol, d'ammoniaque et d'acide acétique, production d'hydrogène...
Diméthyléther (DME)	Recherche avancée / pilote	Carburant, propulseur d'aérosols, matière première pour la production d'oléfines...
Éthylène	Pilote laboratoire / démonstrateur	Précurseur du polyéthylène (plastique le plus produit au monde), du PVC, de l'oxyde d'éthylène, de l'acétaldéhyde, de l'acide acétique et du styrène...
Acide acétique	Recherche avancée	Production de téréphtalate de polyéthylène (PET, bouteilles et textiles), d'acétate de vinyle (peintures, adhésifs, emballages), de cellulose acétate (films, filtres à cigarettes), solvant industriel...
Carbamates	Recherche	Précurseurs des isocyanates et polyuréthanes (mousses, revêtements, adhésifs, isolants), produits agrochimiques (pesticides, herbicides), médicaments (urée substituée), stabilisants de caoutchouc
Acide salicylique	Exploration	Médicaments, cosmétiques, compléments alimentaires...
Graphite synthétique	Pilote / pré-commercial	Anodes de batteries lithium-ion pour véhicules électriques, lubrifiants haute température, électrodes industrielles pour fours à arc électrique, matériaux réfractaires...
Nanotubes de carbone (CNT)	Pilote / pré-commercial	Additif pour anodes de batteries, renfort de matériaux composites (aéronautique, automobile), revêtements conducteurs et ignifuges, interfaces thermiques pour l'électronique...
Graphène	Démonstration	Revêtements anti-corrosion et barrières imperméables aux gaz, composites ultralégers (sport, aéronautique), filtres membranaires pour la dessalement et la purification de l'eau, semiconducteurs de nouvelle génération...

## ► Les matériaux de construction

Parmi toutes les voies de valorisation, la minéralisation du CO<sub>2</sub> est jugée la plus prometteuse d'un point de vue environnemental car elle est la seule à offrir un stockage permanent (plusieurs siècles, voire millénaires) dans les produits (Ademe, 2021 ; Oil and Gas Climate Initiative, 2024 ; Lura et al., 2025 ; World Economic Forum, 2025). Cette approche renvoie à deux procédés principaux.

La production d'agrégats synthétiques tout d'abord consiste à faire réagir le CO<sub>2</sub> avec des déchets industriels alcalins (laitiers d'aciérie, cendres d'incinérateurs, scories d'aciéries, poussières de cimenterie) pour former des granulats (petits cailloux synthétiques). Dans une logique d'usage en cascade du CO<sub>2</sub>, ces granulats peuvent également être obtenus par la pyrolyse des polymères en fin de vie. Présentant plusieurs atouts non négligeables – neutralisation de déchets dangereux, possibilité d'utiliser du CO<sub>2</sub> de moindre pureté... – cette approche représente un fort potentiel volumétrique au regard des dizaines de milliards de tonnes de granulats consommés chaque année dans le monde.

Le marché mondial est estimé entre 0,5 et 2 gigatonnes de CO<sub>2</sub> par an d'ici 2040. Toutefois plusieurs freins entravent son développement : durée du processus de carbonatation, coûts de production plus élevés que les granulats conventionnels issus de carrières, viabilité économique dépendante de la co-localisation entre la source de CO<sub>2</sub> et le gisement de déchets minéraux pour éviter des coûts de transport prohibitifs, difficulté à sortir un produit du statut de déchet, acceptation du produit par la filière BTP...

La minéralisation du béton consiste à utiliser le CO<sub>2</sub> comme adjuvant. Injecté dans le mélange de béton frais ou pendant qu'il durcit, il entraîne une réaction chimique permettant de combler les pores du béton, ce qui augmente sa résistance à la compression. Comme le béton devient plus solide, on peut réduire la quantité de ciment nécessaire (qui est le composant le plus émetteur de CO<sub>2</sub>) sans perdre de performance.

Cette voie de valorisation permet donc à la fois de stocker du carbone et d'éviter d'en émettre à la source. Le marché potentiel resterait cependant limité – 40 à 70 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an à l'échelle mondiale – car le « CO<sub>2</sub>-béton » peut être appliqué au marché des produits en béton préfabriqué mais pas au béton armé en raison d'un risque de corrosion de l'acier à cause de l'acidité du CO<sub>2</sub>.

On retrouve ici aussi les freins de la compétitivité coût par rapport au béton conventionnel et les contraintes logistiques (nécessité d'installer des cuves de CO<sub>2</sub> dans les centrales béton, dispersion et éloignement de ces dernières par rapport aux grandes sources de CO<sub>2</sub>). *A contrario*, les matériaux de construction traités au CO<sub>2</sub> peuvent créer des opportunités de majorer le prix des produits pour vendre des crédits carbone.

# Conclusion

Les technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone sont à la fois indispensables et insuffisamment déployées. Indispensables, parce qu'aucun scénario crédible de neutralité carbone ne peut s'en passer — qu'il s'agisse de neutraliser les émissions résiduelles des secteurs industriels les plus difficiles à décarboner ou de générer les émissions négatives nécessaires pour compenser un dépassement probable des budgets carbone compatibles avec l'Accord de Paris. Insuffisamment déployées, parce que l'écart entre les besoins identifiés par le GIEC et les volumes effectivement captés aujourd'hui reste abyssal.

Sur le volet valorisation, le potentiel est réel — carburants de synthèse, chimie verte, matériaux de construction, nanomatériaux — mais les contraintes sont fortes : pénalité énergétique, coûts supérieurs aux équivalents fossiles, comptabilité carbone complexe, cadre réglementaire incomplet.

La montée en puissance de ces filières semble dépendre autant de percées technologiques que de politiques publiques volontaristes.

Quatre orientations principales sont discutées dans les études récentes :

- ▶ Hiérarchiser et encourager les usages du CO<sub>2</sub> selon leur bénéfice climatique réel, en accordant la priorité aux matériaux à stockage permanent sur les produits à courte durée de vie.
- ▶ Mettre à disposition l'électricité bas carbone et accélérer le déploiement des infrastructures partagées de transport et de stockage nécessaires au développement de la filière.
- ▶ Renforcer la compétitivité économique de la filière à travers la hausse du prix du carbone dans le système européen d'échange de quotas (EU-ETS), car tant que le coût des émissions fossiles reste inférieur au coût du captage et de la transformation du CO<sub>2</sub>, aucune filière de valorisation ne peut atteindre la compétitivité économique sans soutien public.
- ▶ Investir dans la recherche et l'innovation sur les segments où la France dispose d'atouts réels, en articulant mieux les dispositifs de soutien existants autour d'une vision cohérente de l'économie circulaire du carbone.

# Ressources bibliographiques

- Ademe (2021), *Valorisation du CO<sub>2</sub>. Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ?*, Avis d'expert.
- Carbon Gap (2022), *The difference between CCS, CCU, and CDR and why it matters*.
- Commissariat Général au Développement Durable (2023), *La France face aux neuf limites planétaires*.
- Commission de Régulation de l'Énergie (2024), *Le captage et la chaîne de valeur du dioxyde de carbone*.
- European Scientific Advisory Board on Climate Change (2025), *Scaling up carbon dioxide removals. Recommendations for navigating opportunities and risks in the EU*.
- Gidden Matthew et al. (2025), *A prudent planetary limit for geologic carbon storage*, in Nature, Vol. 645.
- Global CCS Institute (2025), *Global Status of CCS 2025*.
- Gouvernement (2025), *Projet de Stratégie Nationale Bas Carbone n°3*, décembre 2025.
- Haut Conseil pour le Climat (2023), *Avis sur la stratégie de capture du carbone, son utilisation et son stockage (CCUS)*.
- IEA (2023), *CCUS Policies and Business Models. Building a commercial market*.
- IPCC (2022), *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change, Working Group III contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- JRC (2024), *Clean Energy Technology Observatory : Carbon Capture, Utilisation and Storage in the European*.
- JRC (2025), *GHG emissions of all world countries - 2025 Report*, European Union.
- Lamb William et al. (2024), *The carbon dioxide removal gap*, in Nature Climate Change volume 14.
- Lange Jean-Paul (2026), *Defossilising fuels and chemicals – a systemic analysis from feedstock and technology, to hurdles and enablers*, in Green Chemistry, 2026, 28.
- LeClerc Heather et al. (2025), *The CO<sub>2</sub> Tree: The Potential for Carbon Dioxide Utilization Pathways*, in ACS Sustainable Chemistry & Engineering 2025, 13, 1.
- Lura Pietro et al. (2025), *Mining the atmosphere: A concrete solution to global warming*, Resources, Conservation & Recycling 212 (2025).
- Masoumilari et al. (2026), *From Emissions to Assets: Sustainable Technologies for CO<sub>2</sub> Capture, Conversion, and Integrated Strategies*, in International Journal of Molecular Sciences, 2026 Jan 14;27(2):847.
- Ministère de l'économie (2024), *État des lieux et perspectives de déploiement du CCUS en France*.
- Oil and Gas Climate Initiative (2024), *Carbon capture and utilization as a decarbonization lever*.
- Pont Emmanuel (2024), *Capture et élimination du carbone : arnaque ou solution pour le climat ?*, Bon Pote.
- Ramirez-Corredores Maria Magdalena (2024), *Sustainable production of CO<sub>2</sub>-derived materials*, in Materials Sustainability | (2024)2 :35.
- de Rochette François et al. (2022), *Élimination du carbone atmosphérique. Introduction aux procédés à émissions négatives*.
- Smith Stephen et al. (2024), *The State of Carbon Dioxide Removal 2024*, 2nd Edition.
- World Economic Forum (2025), *Defossilizing Industry: Considerations for Scaling-up Carbon Capture and Utilization Pathways*.
- World Economic Forum (2026), *Carbon Dioxide Removal Technologies : Market Overview and Offtake*.

Retrouvez toutes les ressources

# millenaire3.com

le site de la prospective de la Métropole de Lyon

Direction de la prospective  
et du dialogue public

20 rue du Lac

CS 33569 - 69505 Lyon cedex 03

**MÉTROPOLE**

**GRAND LYON**

**grandlyon.com**