

Résumé public de l'étude concernant les marchés de valorisation du CO₂

Cette étude avait pour objectif de dresser un état des lieux des voies d'utilisation du dioxyde de carbone (CO₂), dans un contexte en évolution. Le cahier des charges a été rédigé début 2024 pour une fin d'étude en Mars 2025, et l'étude a été co-financée par l'ADEME.

Complémentaire plus qu'alternative au stockage géologique, la filière de valorisation du CO₂ (ou « utilisation du CO₂ », communément appelée « CCU » pour *Carbon Capture and Utilization*) consiste à utiliser le CO₂ comme ressource dans la fabrication de divers produits pour réutiliser du carbone préalablement capté dans des fumées industrielles ou présent dans l'atmosphère afin de limiter la dépendance aux ressources fossiles et leurs impacts environnementaux. Selon les produits fabriqués à partir de ce CO₂, le carbone reste physiquement ou chimiquement lié à ceux-ci pour un temps allant de quelques jours/semaines à quelques années/dizaines d'années avant d'être réémis à l'atmosphère, ou bien il est stocké de manière permanente dans le produit (minéralisation), plutôt que d'être émis directement dans l'atmosphère ou stocké dans le sous-sol (Carbon Capture and Storage, CCS, pour ce dernier cas).

Le CO₂ est déjà actuellement utilisé sans transformation préalable dans certains processus (par exemple dans les serres pour favoriser la croissance des plantes et dans l'industrie agroalimentaire) mais aussi transformé via des réactions chimiques (par exemple pour produire de l'urée ou des carbonates). Le CO₂ étant une molécule à faible énergie chimique et très stable, il faudra pour la plupart des réactions apporter de l'énergie pour réorganiser les atomes de C, H et O (qui constituent dans la plupart des cas les molécules ou produits finaux), et une partie de cette énergie sera conservée dans la molécule produite, ce qui est notamment l'objectif pour les produits énergétiques (e-fuels).

De nombreuses technologies de CCU, de maturités variables, sont en développement, avec des attentes fortes en termes de défossilisation, voire de réduction des émissions de GES (Gaz à Effet de Serre) c'est-à-dire pour offrir des solutions alternatives au carbone fossile, voire présenter un stockage durable de cette forme de CO₂.

Le Club CO₂ a mandaté une étude dans le but d'évaluer selon plusieurs critères le potentiel de développement des différentes filières de valorisation du CO₂ existantes et futures (en développement) en Europe et en France, via :

- la réalisation d'un panorama des marchés des produits issus de la valorisation et de l'utilisation directe du CO₂,
- la qualification et quantification des éléments clés de maturité, caractéristiques techniques, économiques, environnementales des voies d'utilisation directe et des voies de valorisation,
- l'identification des freins au développement des voies de valorisation et de pistes d'actions pour les lever.



Méthodologie

Le panorama de l'étude prend en considération deux familles de marchés :

- les marchés existants d'utilisation du CO₂ (avec et sans transformation de la molécule) : agroalimentaire, production d'urée, métallurgie, horticulture et d'autres secteurs d'utilisation,
- les marchés existants de produits contenant du carbone et qui ne sont pas fabriqués à partir de CO₂ aujourd'hui mais qui, dans le futur, pourraient être fabriqués en recyclant et en transformant du CO₂, notamment à une fin de réduction de la dépendance aux ressources fossiles. Parmi ces nouveaux produits issus de la valorisation du CO₂, ont été étudiés :
 - **E-carburant** (e-fuels) : SAF (Sustainable Aviation Fuel) et carburants maritimes dont kérosène, méthane, diesel et méthanol
 - **E-molécules chimiques** (e-chemicals) : méthanol, éthanol, oléfines (éthylène, propylène), polymères, gaz de synthèse,
 - **Matériaux de construction** : carbonates minéraux dont granulats et béton
 - **Autres produits** : gaz de synthèse, microalgues.

L'étude s'est déroulée en trois phases. La phase 1 a eu pour objet de décrire les marchés actuels du CO₂ ainsi que les différentes voies de valorisation du CO₂ suivantes :

- Pour la production de e-carburants : la méthanation catalytique, la synthèse de Fischer Tropsch (FT) et l'hydrocraquage ainsi que la méthanolation
- Pour la production de molécules chimiques : l'hydrogénation du CO₂, la réduction électrochimique du CO₂, la carboxylation et le reformage sec
- Pour la production de matériaux de construction : la carbonatation minérale
- Pour les autres productions (microalgues, méthane) : photosynthèses (basins ouverts et photobioréacteurs) et méthanisation biologique

Sur la base d'une recherche documentaire à travers la littérature scientifique existante et la documentation disponible (plus de 300 publications consultées), des **cartes d'identité** pour chacune de ces voies ont été réalisées, combinant informations techniques (énergie, pression, température, pureté...), économiques ou de marché (TRL, volumes, acteurs...), environnementales (consommation de ressources, surface directe et indirecte, empreinte carbone) et réglementaires.

La phase 2 a ensuite eu pour objectif, notamment à travers 20 entretiens, d'approfondir certains produits issus de la valorisation du CO₂ : les e-carburants, les oléfines, le méthanol, le béton, le méthane (méthanation biologique) et les microalgues.

Enfin, des recommandations pour lever tout ou partie des verrous identifiés pour les différentes voies étudiées dans la phase 2 ont été formulées dans la phase 3.

L'étude présente naturellement des limites. La disponibilité des informations a en effet parfois limité l'accès ou la vérification de certaines données, en particulier pour les technologies ou les voies de maturité limitée, mais aussi pour certains aspects précis : utilisation de ressources



autres que H₂ ou CO₂, conséquences environnementales hors empreinte carbone ou encore conséquences sociales. Ces points mériteraient donc un approfondissement dans le futur.

Résultats

Les **usages actuels en France** représentent environ 1.1Mt de CO₂ par an, dont 800kt/an marchandes, répartis entre l'industrie agro-alimentaire (env. 600kt/an), la production d'urée (env. 300kt/an) et l'agriculture et autres usages (env. 200kt/an). Près de 40% de ce CO₂ est issu de la production de bioéthanol ou de biogaz, 20% des raffineries et 17% de la production d'ammoniac. Le CO₂ est très souvent transporté par camions et sous forme liquide.

Le **cadre réglementaire** est un paramètre essentiel de l'émergence de ces nouvelles voies de valorisation et il se concentre actuellement sur l'impact climatique des différentes options de valorisation du CO₂, plutôt que les dimensions économiques ou géopolitiques. Ainsi la minéralisation du CO₂, permettant un stockage de long terme de celui-ci (au moins 35 ans, tel que défini dans le texte 2024/3012), est reconnue dans l'ETS (European Emission Trading Scheme) ou dans le marché carbone volontaire, et devrait faire partie du prochain Carbon Removal Certification Framework. Cet avantage financier pourrait être décisif dans le développement de la carbonatation.

Permettant potentiellement de décarboner l'usage des carburants sur l'ensemble de leur cycle de vie, les carburants synthétiques (e-fuels) sont eux encadrés par la Directive sur les Energies Renouvelables (2018/2001 et 2023/2413). Reconnus par les règlements ReFuel EU Aviation et Fuel EU Maritime, qui adressent des secteurs ne disposant pas d'alternatives aux carburants liquides carbonés, ces carburants synthétiques permettent aux obligés de se conformer aux obligations réglementaires et de réduire leur empreinte carbone.

Si la Communication sur les Cycles Durables du Carbone fixe des objectifs pour la chimie en 2030, la reconnaissance de l'utilisation du CO₂ dans les produits chimiques par l'ETS ou les marchés volontaires est encore floue, et ne permet pas aujourd'hui de combler la différence de coût entre ces alternatives et leur référence fossile.

Enfin, la voie biologique ne dispose aujourd'hui d'aucun contexte réglementaire spécifique. Du point de vue des reportings, les standards actuels manquent encore de clarté pour permettre une communication uniforme des éliminations de CO₂ et de leur allocation entre les différentes parties prenantes de la chaîne de valeur.

Les **intrants clefs** de la valorisation du CO₂ sont, en plus du CO₂ et selon la voie de valorisation considérée, l'hydrogène, l'électricité, l'eau et la biomasse, et la réglementation actuelle influence leur origine. S'il n'y a pas de contraintes physique ou chimique à utiliser une source d'énergie renouvelable pour les intrants énergétiques tels que l'hydrogène, la réglementation EU incite à l'utilisation d'énergie renouvelable. A l'horizon 2041, cette même réglementation imposera que le CO₂ utilisé soit biogénique (c'est-à-dire provenant de la production de biocarburants/bioliquides/biogaz ou de la combustion de biomasse) pour produire des



carburants renouvelables pour le transport. Dès lors, ces contraintes réglementaires mais aussi la réalité physique de disponibilité des différents intrants dont le CO₂ doivent être pris en compte pour planifier les différents types d'utilisation du CO₂ sur les territoires du pays.

L'**énergie totale** nécessaire pour transformer une tonne de CO₂ varie selon la voie de valorisation, notamment selon la typologie du produit (énergétique ou non). Pour les produits utilisant de l'hydrogène (e-carburants et e-chemicals en particulier), l'énergie indirecte consommée par le procédé de production d'H₂ représente plus de 85% de l'énergie totale consommée par le procédé, alors que le captage du CO₂ représente 8 à 15%. Une part non négligeable de l'énergie consommée est stockée dans le produit et le rendement énergétique de la production de celui-ci est ainsi de l'ordre de 40 à 50%. Pour les granulats, la quantité d'énergie utilisée varie fortement et est fonction de leur capacité d'absorption du CO₂. Cette consommation d'énergie peut s'avérer relativement limitée, tout comme pour les microalgues qui absorbent l'énergie de la lumière, mais le service rendu est différent de celui des produits énergétiques.

Les **exigences de pureté, pression et température du CO₂** varient également selon les procédés et influencent ainsi leur faisabilité. Par exemple, les e-carburants et e-molécules chimiques ont besoin d'un niveau de pureté élevé du CO₂ tandis que les carbonates minéraux et microalgues peuvent accepter un niveau de pureté plus faible, jusqu'aux fumées directes de certains procédés industriels. Les voies peuvent donc être complémentaires, selon les caractéristiques des sources d'émission disponibles et les atouts des territoires concernés (accès au foncier, à l'eau, à l'électricité, au CO₂...).

Concernant l'**eau**, les données quantitatives publiques concernant la consommation directe et les exigences de qualité de l'eau pour ces procédés sont rares et il faut veiller à distinguer la consommation (eau qui ne retourne pas immédiatement au milieu naturel) des prélèvements (total de l'eau prélevée dans le milieu avant consommation ou restitution immédiate au milieu). Toutefois, il est clair que la production d'hydrogène par électrolyse pourrait représenter des prélèvements d'eau significatifs localement et un espace nécessaire aux installations associées lui aussi non négligeable. Les impacts sur l'eau doivent donc être étudiés précisément et en prospective de manière à orienter les choix techniques dans une perspective de limiter l'exposition des projets aux risques climatiques.

De même, peu d'informations quantitatives précises sont disponibles sur les **surfaces nécessaires** pour les procédés d'utilisation du CO₂. Dans le cas de la minéralisation, une grande surface est nécessaire pour l'entreposage des granulats et des éléments préfabriqués en béton.

La question du bénéfice climatique du CCU

L'utilisation du CO₂ permet de « défossiliser » un usage (c'est-à-dire éviter d'extraire du carbone fossile pour cet usage/ce produit) en développant une économie circulaire du carbone et peut aussi dans certains cas apporter un bénéfice climatique sensible à plus ou moins long terme.

La consommation de CO₂ par tonne de produit varie selon les filières de valorisation du CO₂. L'éthylène et dans une moindre mesure le e-kérosène et e-diesel sont les voies les plus



consommatrices en CO₂ par tonne de produit fini (traduisant le fait que ces molécules contiennent plusieurs atomes de carbone) et les granulats la voie la moins consommatrice. En tenant compte de la taille de ces différents marchés de produits finis, les volumes théoriques d'utilisation de CO₂ pour les granulats pourraient être similaires à ceux des e-carburants/e-chemicals. Mais il convient bien entendu de tenir compte des autres intrants pour affiner ce potentiel de consommation de CO₂.

La question du bénéfice climatique du CCU nécessite une vision globale : de la prise en compte de l'usage du produit (stockage long terme par la minéralisation ou libération court terme du CO₂ pour les usages carburants), ainsi que des émissions de GES de la phase de production, qui dépendent de choix techniques et de sources d'énergie utilisées directement mais aussi sur l'amont de la chaîne de valeur. L'ensemble du cycle de vie doit donc être pris en compte, comme c'est déjà le cas dans la RED III pour les carburants d'origine biologique ou non destinés au transport. A l'aide d'une telle analyse de cycle de vie, les autres impacts environnementaux peuvent d'ailleurs aussi être évalués, ce qui semble indispensable eu égard aux connaissances des limites planétaires. Il a été constaté que ces études ACV sont peu disponibles et en tout état de cause avec des scénarios de référence ou des périmètres variés. Or cette situation de référence est essentielle dans l'évaluation du bénéfice climatique du projet. Le Club CO₂ appelle en conséquence à les uniformiser ou à les encadrer. Pour autant, il a été observé que l'empreinte carbone des produits du CCU est inférieure à la voie traditionnelle sous réserve de veiller aux émissions du transport pour la minéralisation et à l'origine de l'énergie électrique utilisée pour la production d'H₂.

Les verrous

D'une manière générale, nous avons pu constater que les conséquences des projets ou technologies sur les populations humaines et leurs conditions de vie ne sont pas du tout couverts par les publications consultées. Il conviendrait donc d'y remédier. Cela dit, un premier verrou majeur se situe dans la disponibilité des intrants, au premier desquels l'hydrogène renouvelable ou bas carbone, qui est associé au CO₂ pour produire les eFuels/e-chemicals (méthanol en particulier), mais aussi du fait de l'absence actuelle d'infrastructures massives.

Le coût de production de ces produits recyclant le CO₂ est un autre verrou très sensible, du fait du procédé de transformation lui-même, mais aussi du fait de la production d'hydrogène pour les voies concernées. A cet égard, les produits bénéficiant d'un cadre réglementaire défini sont en meilleure posture pour se développer et les progrès technologiques ou de procédés devraient permettre de diminuer le surcoût par rapport aux produits actuels fossiles. La disponibilité du CO₂ n'a pas été traitée dans cette étude mais fait l'objet, pour le CO₂ biogénique spécifiquement, d'une autre étude du Club CO₂, dont le résumé est également disponible sur le site internet du Club CO₂.



Que faire ?

Afin de lever les verrous observés pour les différentes voies de valorisation, plusieurs propositions ont été faites et ce pour les différents acteurs de la chaîne de valeur : puissance publique, porteurs de projets et émetteurs, Club CO₂. L'émergence de ces nouvelles chaînes de valeurs nécessite l'action de l'ensemble des acteurs.

La collaboration entre émetteurs de CO₂, porteurs de projets et utilisateurs finaux semble essentielle pour trouver les synergies qui font du sens à l'échelle territoriale ou de l'ensemble de la chaîne de valeur du CCU, mais aussi au regard du CCS, avec qui les problématiques de captage et transport de CO₂ sont partagées.

Par ailleurs, au-delà d'un indispensable soutien financier des premiers acteurs français dans un contexte de concurrence internationale, il s'agit aussi de donner de la visibilité sur la place du CCU en France, de clarifier des règles de comptage du carbone et la traçabilité du CO₂, et de coordonner l'usage des ressources naturelles et énergétiques (électricité, biomasse, eau...) sur lesquelles d'autres activités comptent aussi pour se décarboner.

Le Club CO₂, quant à lui, pourrait continuer à éclairer le débat à travers des études et autres communications publiques : clarification des impacts environnementaux et des besoins en ressources des différentes filières, vulgarisation, veille R&D, relais d'informations ou d'études territoriales des initiatives ZIBAC (Zones Industrielles Bas Carbone), évaluation des impacts sociaux des projets... Le Club CO₂ pourrait aussi contribuer à créer du lien à différents niveaux du territoire et fédérer les différents acteurs de cette chaîne de valeur en construction.

Pour finir, la question économique n'a pas été traitée en détail dans cette étude. Or, elle reste incontournable dans le développement de ces nouvelles chaînes de valeur qui entrent en concurrence avec les solutions ou les produits actuels utilisant des énergies fossiles. Cette question économique doit absolument être traitée en lien avec les questions environnementales, sociales (dont l'emploi) et de souveraineté énergétique et technique, tout en intégrant l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur.