

AVIS D'EXPERT

Sept
2021

Valorisation du CO₂

Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ?

Ce qu'il faut retenir

Le captage et la valorisation -ou utilisation- du CO₂ (CCU) regroupent différentes technologies qui utilisent le CO₂ capté sur des sources industrielles (fumées de combustion en particulier) ou des sources utilisant de la biomasse (CO₂ biogénique) voire dans l'air en tant que matière première pour un large spectre d'applications et de produits. Le CCU peut être considéré comme un levier de décarbonation. Cependant la contribution globale de la valorisation du CO₂ en termes de réduction des émissions de CO₂ reste difficile à quantifier. En effet, les analyses de réduction effective des émissions de CO₂ dépendent de nombreux paramètres et les volumes potentiels varient grandement d'une voie de valorisation à l'autre.

Ainsi, cet avis vise à fournir des clés d'analyse pour dégager les conditions pertinentes de valorisation du CO₂ en analysant les différentes voies de valorisation (l'utilisation directe, la valorisation chimique, la valorisation biologique) en fonction de la maturité des technologies, leur marché, leurs coûts et la réglementation.

Ce document montre que la valorisation du CO₂ pourra contribuer aux objectifs de neutralité carbone sous réserve de favoriser l'utilisation du CO₂ biogénique tout en utilisant massivement de l'énergie renouvelable, et en privilégiant la fabrication de produits avec un stockage temporel long du CO₂ (au minimum plusieurs dizaines d'années). À ce titre, la minéralisation du CO₂ (pour le BTP par exemple) est une piste pertinente.

L'ADEME préconise :

- De renforcer le cadrage normatif sur l'évaluation de l'impact climatique du CCU dans une logique d'analyse de cycle de vie (ACV) notamment pour clarifier l'allocation des réductions d'émissions entre l'émetteur de CO₂ et l'utilisateur de ce CO₂ capté et valorisé.
- D'élaborer une vision stratégique et partagée du développement du CCU et des systèmes de soutien qui pourraient être mis en place pour favoriser le développement des voies les plus pertinentes d'un point de vue environnemental.

Ce document est diffusé par l'ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Avis Expert ADEME réalisé par :

EL KHAMLICHI Aïcha
Service Industrie

Relecture :

BORDE Cyrielle
Service Industrie

HOUNGBE Michelle
Service Industrie

PADILLA Sylvie
Service Industrie

DEVRIES Valentin
Direction Entreprise et Transitions Industrielles

MARCHAL David
Direction Exécutive de l'Expertise et des Programmes

TABLE DES MATIÈRES

CE QU'IL FAUT RETENIR	1
Glossaire	4
Lexique	5
Synthèse et Recommandations	6
1. CONTEXTE ET ENJEUX	11
1.1. Valorisation du CO ₂ et neutralité carbone	11
1.2. Description des technologies de valorisation du CO ₂	13
1.2.1. L'utilisation directe du CO ₂	13
1.2.2. La valorisation chimique du CO ₂	14
1.2.3. La valorisation biologique du CO ₂	16
2. DES POTENTIELS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ COMPLEXES À APPRÉHENDER	18
2.1. Temps de stockage du CO ₂ dans le produit	18
2.2. Évolution du contenu carbone du produit substitué	18
2.3. À chaque source de CO ₂ des conditions différentes impactant la réduction de CO ₂	19
2.3.1. Source de CO ₂ d'origine fossile	19
2.3.2. Le CO ₂ biogénique	20
2.3.3. Le CO ₂ atmosphérique	20
2.4. L'ACV depuis la source de CO ₂ jusqu'à la fin de vie des produits, pour évaluer les bénéfices/impacts du CCU	21
3. CARACTÉRISATION DES PRINCIPALES FAMILLES DE PRODUITS ISSUS DU CO₂	26
3.1. Les carburants synthétiques ou électrocarburants : de nombreuses exigences pour s'assurer de répondre à l'enjeu climatique	26
3.1.1. Les principales filières de production d'électrocarburants : méthanol et méthane	26
3.1.2. Les bénéfices environnementaux des carburants à partir de CO ₂ : sous quelles conditions ?	28
3.1.3. Un surcoût élevé même avec des infrastructures transport existantes	29
3.1.4. Et la réglementation ?	29
3.2. Les produits chimiques : une alternative à la pétrochimie ?	30
3.2.1. Quels produits chimiques sont concernés ? Quelle maturité des procédés ?	30
3.2.2. Un bénéfice environnemental limité car lié au rendement énergétique de synthèse et à la ré-émission à terme du CO ₂	32
3.2.3. Selon les « CO ₂ -produits » chimiques, de grandes disparités d'opportunités de marché	33
3.3. Les produits carbonatés : un stockage pérenne pour des applications à déployer	34
3.3.1. La carbonatation, qu'est-ce que c'est ?	34
3.3.2. Et la réglementation ?	36
3.3.3. Une réduction effective des émissions mais une évaluation difficile	36
3.4. Le dioxyde de carbone : et pourquoi ne pas l'utiliser directement ?	37
RÉFÉRENCES	39

GLOSSAIRE

ACV : Analyse de Cycle de Vie

BioGNV : Gaz Naturel pour Véhicules issu de la méthanisation de la biomasse (déchets organiques)

BTP : Bâtiments et Travaux Publics

C : Atome de carbone

CaCO₃ : Carbonate de calcium

CaO : Chaux

CAPEX : Capital EXPenditure

CCU : Captage du Carbone et Utilisation (CCU Carbon Capture and Utilization en anglais)

CO₂ : Dioxyde de carbone

CSC : Captage et Stockage géologique du CO₂ (CCS Carbon Capture and Storage en anglais)

DAC : Direct Air Capture

DG ENV : Direction Générale de l'Environnement de la Commission Européenne

DG ENER : Direction Générale de l'Énergie de la Commission Européenne

DME : Diméthyléther

EnR : Énergie Renouvelable

EOR : Enhanced Oil Recovery

ETS : Emission Trading System (SEQE-UE : Système d'échange de quotas d'émission de l'UE en français)

GES : Gaz à Effet de Serre

Gt : Giga tonnes (x 1 000 000 000 tonnes)

GWP : Global Warming Potential (Potentiel de Réchauffement global en français)

H : Atome d'hydrogène

H₂ : Di hydrogène

ICV : Inventaire de Cycle de Vie

IEA : International Energy Agency (AIE : Agence Internationale de l'Énergie en français)

JRC : Joint Research Centre de la Commission Européenne

Kt : Kilo tonnes (x 1000 tonnes)

MeOH ou **CH₃OH** : Méthanol

MgCO₃ : Carbonate de magnésium

MgO : Magnésie

Mt : Million de tonnes (x 1 000 000 tonnes)

MW : Méga Watt

NOx : Oxydes d'azote

OPEX : Operating EXPenses

P : Pression

PEFCR : Product Environmental Footprint Category Rules

PEM : Proton Exchange Membrane

Ppm : Partie par million

R&D : Recherche et Développement

RED : Renewable Energy Directive

RWGS : Reverse Water Gas Shift (synthèse de carburant synthétique par valorisation de CO₂)

SNBC : Stratégie Nationale Bas Carbone

SOEC : Solid Oxide Electrolyzer Cell

T : Température

LEXIQUE

CO₂ atmosphérique : CO₂ présent dans l'atmosphère

CO₂ biogénique : CO₂ issu des procédés de combustion de la biomasse

CO₂ fossile : CO₂ issu de la combustion de matière première fossile

CO₂ minier : CO₂ extrait des réservoirs naturels de CO₂ du sous-sol

CO₂ supercritique : CO₂ placé dans des conditions de pression (7,3 MPa) et de température (31°C) au-delà de son seuil critique

Électrolyse : Réaction durant laquelle les composés chimiques sont décomposés en substances simples ou composites sous l'influence d'un courant électrique

EOR : Enhanced Oil Recovery (en anglais) et en français, RAH : Récupération assistée d'hydrocarbure via l'utilisation de CO₂ supercritique

Hydrogénation : Réaction chimique qui consiste à ajouter une molécule de H₂ à un autre composé chimique

Procédé Fischer Tropsch : Procédé de synthèse des hydrocarbures à partir de CO et de H₂

RWGS : Reverse Water Gas Shift (réaction du gaz à l'eau) est la réaction du CO₂ et H₂ en CO et H₂O

Syngaz : Gaz de synthèse (CO/H₂) provenant de procédés thermochimiques

Unité fonctionnelle : Dans le cadre d'une Analyse de Cycle de Vie, l'unité fonctionnelle sera utilisée comme une unité de référence pour quantifier la performance d'un système de produits (ISO 14044)

Vaporeformage : Procédé de conversion catalytique des hydrocarbures en utilisant H₂O comme oxydant

SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Le captage et valorisation du CO₂, ou le captage et utilisation du CO₂ (CCU-Carbon Capture and Utilisation) consiste à capter le CO₂ pour l'utiliser comme matière première directe ou pour la synthèse de carburants, produits chimiques ou matériaux. Il comporte la même brique de captage (séparation du CO₂ des fumées) que le captage et stockage géologique du CO₂ (CSC), mais le devenir du CO₂ est différent car au lieu d'être stocké dans le sous-sol, il est réutilisé.

L'objectif de cet avis est d'identifier les principales voies de valorisation du CO₂ et de donner les clés d'analyse pour déterminer les conditions leur permettant de constituer un potentiel intéressant en termes de réduction d'émissions de CO₂ (évaluation qualitative). Cela suppose notamment d'identifier les principaux écueils à éviter lors de l'évaluation environnementale de ces voies de valorisation du CO₂, ainsi que de présenter des éléments liés aux possibles marchés visés et leur potentiel économique.

DES OPPORTUNITÉS EN PLEIN DÉVELOPPEMENT TECHNOLOGIQUE POUR RÉUTILISER LE CO₂, À DÉFAUT DE LE STOCKER

Actuellement, 230 Mt/an¹ de CO₂ sont consommées dans le monde pour des usages industriels (IEA, 2019). Les principales utilisations sont la production d'urée et la production d'hydrocarbures (EOR²). En France, 0,8 Mt/an de CO₂ sont consommées par an dont 70 % par l'industrie agro-alimentaire (boissons gazeuses, conservation des aliments, ...), les autres usages étant les cultures agricoles, la chaîne du froid, le traitement de l'eau, les procédés industriels et d'autres usages à très faible volume (exemple : agent d'extinction dans les extincteurs). Au niveau mondial, ce CO₂ est soit extrait de réservoirs naturels de CO₂ dans le sous-sol³ (on parle de « CO₂ minier »), soit capté en sortie d'unités industrielles produisant des sources concentrées de CO₂, comme sur les unités de production d'ammoniac, voire sur des bioraffineries ou sur des méthaniseurs valorisant ainsi du CO₂ biogénique.

Les enjeux du changement climatique et le développement de nouvelles technologies de captage adaptées à des émissions de CO₂ plus diluées (comme les fumées) vont conduire à une plus grande disponibilité de CO₂ utilisable comme matière première, et mieux distribué sur le territoire. Ainsi, dans une approche complémentaire au stockage géologique (CSC), **de nouveaux procédés de valorisation de CO₂ sont en cours de développement pour de nouvelles applications en chimie, pour les matériaux ou pour les carburants, mais très peu ont atteint le stade commercial.**

D'autres initiatives viseraient à valoriser le CO₂ atmosphérique (DAC – Direct Air Capture). Néanmoins, dans le contexte actuel, le développement de cette voie semble difficilement justifiable au regard de la pénalité énergétique très importante engendrée par l'effort de concentration du CO₂ à fournir pour le capter de l'air, en comparaison avec les autres sources de CO₂ existantes disponibles sous une forme plus concentrée (CO₂ biogénique, CO₂ provenant d'industries lourdes).

DES USAGES DIFFÉRENTS DU CO₂ NÉCESSITANT FORCÉMENT DE L'ÉNERGIE POUR SA TRANSFORMATION

Une des problématiques majeures réside dans la consommation énergétique importante nécessaire aux procédés de valorisation du CO₂. En effet, d'un point de vue thermodynamique, le CO₂ est une molécule très peu réactive ; sa transformation chimique en d'autres molécules plus complexes est donc fortement consommatrice d'énergie. Cette demande en énergie varie en fonction des différents produits synthétisés. Ainsi, les molécules nécessitant **la plus grande consommation énergétique sont, par ordre décroissant en besoins d'énergie :**

- Les molécules dites énergétiques (ex : méthane ou carburants synthétiques),
- Les molécules organiques (ex : polymères),
- Les produits issus de la carbonatation minérale (ex : carbonates inorganiques utilisés dans les matériaux de construction), qui sont ceux qui nécessitent le moins d'énergie.

1. Source : IEA, «Putting CO₂ to Use - Creating value from emissions,» 2019

2. EOR: Enhance Oil Recovery – récupération assistée d'hydrocarbures via l'utilisation du CO₂ supercritique

3. En France, il n'y a plus d'extraction de CO₂ minier depuis 2012.

AVIS D'EXPERT

Par ailleurs, cette consommation énergétique est réduite dans le cas des procédés de valorisation biologique du CO₂ où la réaction est assurée par des micro-organismes qui utilisent le CO₂ comme apport nutritif. Ces procédés font l'objet de nombreuses recherches (fermentation enzymatique, production de microalgues, ...).

DES POTENTIELS DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS DE GES TRÈS VARIABLES

Le principal intérêt de la valorisation du CO₂ est le **remplacement de carbone d'origine fossile par du CO₂ capté**. Il est souvent annoncé que la valorisation permet de réduire par 2 les émissions de CO₂, en générant une seule émission pour un double usage⁴. Cette première approche théorique ne prend pas en compte la globalité des émissions, en particulier, celles nécessaires au captage et à la purification du CO₂ ainsi que celles nécessaires au procédé de transformation de ce CO₂. Aussi, l'évaluation du **bénéfice environnemental de ces voies de valorisation du CO₂** ne peut se résumer à ce facteur 2 au vu des nombreuses hypothèses sous-jacentes (type de produits, sources de CO₂, énergie consommée pour le captage, la purification et la transformation du CO₂, source d'électricité renouvelable ou non, ...). Cela nécessite une analyse environnementale détaillée au périmètre élargi, couplée à une analyse économique, quasiment projet par projet.

Plusieurs points importants sont ainsi à prendre en compte :

- Le volume de CO₂ capté et réutilisé dans un procédé de valorisation du CO₂ ne correspond pas à une réduction nette d'émissions de CO₂, puisqu'**il faut tenir compte à la fois des émissions de CO₂ qui ont été émises par le procédé de transformation retenu (captage, purification, liquéfaction, si nécessaire) et du mix énergétique utilisé pour celui-ci**.
- **En fonction du produit synthétisé et de son usage, le CO₂ sera dans la majorité des cas réémis, et ce, plus ou moins rapidement**. Par exemple, pour un carburant synthétisé à partir de CO₂ capté, le CO₂ sera réémis à l'atmosphère rapidement, lors de la combustion du carburant. Même dans le cas de réutilisation directe de CO₂ (sans transformation), une partie du CO₂ sera réémise.

Par exemple, dans le cas où le CO₂ est réinjecté dans une serre pour favoriser la croissance des plantes : il y aura forcément des pertes dues au CO₂ non capté par ces plantes.

- En fonction de l'horizon de temps, le produit remplacé à considérer ne sera pas le même : à court terme, le CO₂ issu de la valorisation du CO₂ se substituera à des produits à base fossile. Mais, à un horizon plus lointain, les produits à base de CO₂ issu de la valorisation du CO₂ entreront en compétition avec d'autres solutions bas carbone (produits bio-sourcés, hydrogène, ...). L'impact de leur usage sur la baisse des émissions de CO₂ sera donc plus faible. **La pertinence des produits à base de CO₂ devra donc être justifiée, dans le temps, par rapport aux produits à remplacer**.
- La taille du marché considéré reste encore incertaine et a une influence directe sur le potentiel de réduction des émissions de CO₂. Les produits énergétiques et ceux issus de la minéralisation correspondent à des marchés à grand volume et donc potentiellement à une réduction importante des émissions de CO₂. Dans le cas de marchés de niche, ce qui peut être le cas pour certains polymères, le potentiel de réduction d'émissions de CO₂ sera forcément plus limité. **L'analyse de marché est donc nécessaire pour évaluer le potentiel de substitution de ces nouveaux produits, en y incluant une analyse des coûts de production correspondants**.

Par ailleurs, pour tous les émetteurs en dehors du marché européen carbone SEQUE, il n'existe pas à date de cadre normatif d'attribution des réductions d'émissions entre l'émetteur de CO₂ et l'utilisateur de ce CO₂ capté et valorisé. Un futur cadre normatif élargi à l'ensemble des émetteurs de CO₂ permettrait notamment d'éviter de double-comptes en termes de réduction, tout en identifiant mieux les acteurs susceptibles de revendiquer les bénéfices de cette valorisation de CO₂.

La valorisation du CO₂ peut donc être considéré comme un levier de décarbonation. Néanmoins, sa contribution globale en termes de réduction des émissions de CO₂ est difficile à quantifier, notamment en raison du potentiel de valorisation du CO₂ qui est hétérogène et variable selon les voies de valorisation et les usages considérés. Il est donc indispensable d'analyser l'ensemble des éléments précédents pour apprécier pleinement le potentiel de la valorisation du CO₂ en termes de réduction d'émissions de CO₂ ainsi que d'effectuer des comparaisons entre les différentes voies possibles de valorisation du CO₂.

⁴ En comparaison avec les sources d'énergie fossile et variable selon le type de produit issu de la valorisation du CO₂ (cf. figure 14 avec l'exemple des électrocarburants)

AVIS D'EXPERT

Enfin, dans le cadre d'une société décarbonée, il convient de noter que le recours à la valorisation du CO₂ implique de compenser par des émissions négatives tout CO₂ fossile capté qui serait réémis.

QUELQUES COMMERCIALISATIONS RÉUSSIES MALGRÉ UNE COMPÉTITIVITÉ ÉCONOMIQUE ENCORE DIFFICILE À TROUVER

Dans les conditions actuelles, les produits issus des procédés de valorisation du CO₂ sont **loin d'être compétitifs par rapport aux produits fossiles** qui sont difficiles à concurrencer.

Actuellement, les carburants synthétiques issus de CO₂ captés sont entre 4 à 10 fois plus chers en comparaison avec les hydrocarbures. Le choix de soutenir la valorisation du CO₂ doit se faire en comparaison aux soutiens possibles aux autres filières en développement de carburants bas carbone qui sont aujourd'hui plus compétitives. Pour autant, d'éventuelles baisses de coûts pourraient intervenir grâce au développement technologique dans les décennies à venir.

Pour les produits chimiques, bien que les coûts de production soient plusieurs fois plus élevés par rapport au prix du marché du produit concerné « fossile », ils bénéficient pour certains d'entre eux de plusieurs avantages permettant leur commercialisation malgré ces coûts plus élevés : nouveaux produits avec des propriétés nouvelles, développement de nouveaux procédés moins polluants... **Ainsi quelques produits sont déjà commercialisés malgré leur surcoût car ils répondent à des besoins et marchés très spécifiques.** Pour les produits issus de la minéralisation du CO₂, les coûts de production sont actuellement plusieurs fois plus élevés que ceux des produits conventionnels. De plus, le marché visé par les produits carbonatés correspond à des produits à faible valeur ajoutée, d'où la difficulté pour ces nouveaux produits de pénétrer le marché. Toutefois, **le principal avantage de ces produits est l'immobilisation du CO₂ de manière permanente** ce qui peut conduire à une réduction effective plus importante des émissions de CO₂. Via des mécanismes de soutien adaptés (ex : proposition d'intégrer la minéralisation dans le marché carbone européen), ces nouveaux produits carbonatés pourraient devenir compétitifs.

Un autre procédé de carbonatation pourrait aussi être développé dans le secteur du traitement de certains déchets industriels dangereux (exemple : cendres volantes, laitiers d'aciérie, ... qui nécessitent d'être neutralisés au préalable en vue de leur réutilisation).

Cette technologie pourrait être compétitive par rapport aux traitements existants et pourrait même permettre la réutilisation ultérieure des déchets comme intrants pour des matériaux, participant ainsi au développement de l'économie circulaire.

EN CONCLUSION, SOUS UN MÊME VOCABLE « VALORISATION DU CO₂ (CCU) », DES RÉALITÉS DE DÉCARBONATION TRÈS VARIABLES EN FONCTION DU TYPE DE TECHNOLOGIE ET DE SUBSTITUTION RETENUES...

La valorisation du CO₂ englobe une grande variété de produits et de procédés extrêmement différents, allant des carburants aux produits du BTP. Il est donc difficile de se positionner sur les bénéfices de la valorisation du CO₂ dans sa globalité, sans rentrer dans le détail des procédés et de l'usage des produits.

Une méthodologie cohérente et unifiée d'évaluation environnementale, de type Analyse de Cycle de Vie (ACV), doit donc être utilisée pour les différents produits/technologies de CO₂ en prenant en compte la source de CO₂ et la partie captage.

Les projets de valorisation du CO₂ combinant notamment de la récupération de chaleur fatale ou de l'utilisation d'électricité renouvelable permettront de réduire la pénalité énergétique liée à la transformation du CO₂ (captage, purification, liquéfaction) évoquée ci-avant.

Parmi toutes les voies de valorisation du CO₂, et dans la configuration optimale citée ci-avant, la minéralisation est la plus intéressante. D'une part, le CO₂ est immobilisé de manière permanente, et d'autre part il peut être combiné avec d'autres intrants comme les déchets, ce qui contribue plus globalement aux principes d'économie circulaire et au développement d'une industrie plus durable.

AVIS D'EXPERT

Dans tous les cas, les voies de valorisation du CO₂ les plus performantes en termes de réduction d'émissions de CO₂ et de contribution à la neutralité carbone seront à privilégier. Ainsi, la valorisation du CO₂ pourra contribuer aux **objectifs de neutralité carbone** sous réserve de favoriser **l'utilisation du CO₂ biogénique** tout en utilisant massivement de **l'énergie renouvelable**, et en privilégiant la fabrication de produits avec **un stockage temporel long du CO₂** (plusieurs dizaines d'années).

... ET DES DÉVELOPPEMENTS QUI SERONT FORCÉMENT À ARBITRER AU REGARD D'AUTRES ENJEUX DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Dans le cadre de la décarbonation des secteurs (industrie, transport...), beaucoup de nouveaux procédés vont se développer en se basant sur l'utilisation d'électricité renouvelable. Le développement des énergies renouvelables électriques, dont la production est variable, devrait induire progressivement de plus en plus de périodes de surproduction. Pouvoir utiliser cette

électricité renouvelable bon marché pour la transformer en d'autres vecteurs plus facilement stockables est un enjeu important. La pertinence de l'usage de cette électricité renouvelable pour les voies de valorisation du CO₂ devra toutefois se poser au regard des autres usages de l'électricité ou des nouveaux moyens de stockage qui pourrait être déployé à court-moyen terme.

Par exemple, la synthèse des carburants liquides à partir de CO₂, qui requiert une grande consommation énergétique, doit se poser au regard des autres solutions de mobilité plus efficaces (électromobilité, mobilité hydrogène...). Il faut aussi prendre en compte les avantages que présentent les produits à base de CO₂ qui sont facilement substituables aux produits fossiles sans changement d'infrastructures (ex : pour les carburants, utilisation des mêmes infrastructures de transport et de distribution). Ainsi l'avantage des carburants liquides synthétiques réside dans le fait de pouvoir les utiliser pour certains secteurs du transport particulièrement difficiles à décarboner par d'autres technologies, plus efficaces, comme le transport maritime ou l'aviation.

LES PRINCIPALES RECOMMANDATIONS DE L'ADEME

La criticité et l'urgence du changement climatique supposent que tous les leviers de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) puissent être activés à bon escient. En ce qui concerne la valorisation du CO₂, et pour en garantir un usage optimum tant en matière de réduction de GES que d'investissements à y consacrer, l'ADEME préconise 3 types d'actions :

- **Renforcer le cadrage normatif sur l'évaluation de l'impact climatique de la valorisation du CO₂ dans une logique d'analyse de cycle de vie (ACV) pour assurer un développement équilibré des filières de la valorisation du CO₂ au regard des autres filières mobilisées pour la Transition Énergétique :**

- Finaliser la formalisation des règles d'établissement des ACV⁵ nécessaires à l'évaluation des projets de valorisation du CO₂, dans le cadre des travaux réglementaires/normatifs en cours à l'échelle européenne (ex : Travaux de la DG ENV pour le développement de guides méthodologiques pour l'évaluation environnementale de différents produits –PEFCR⁶) ;
- Formaliser les principes d'allocation des réductions des émissions de GES imputables aux projets de valorisation du CO₂ pour éviter les double-comptages, mais aussi clarifier les intérêts respectifs des différents acteurs d'un projet de valorisation du CO₂ ;
- Intégrer ces principes dans les différents outils de politiques publiques nationaux ou européens. Par exemple : intégration de la minéralisation dans le marché carbone européen SEQUE, intégration de critères d'analyse de type ACV dans l'évaluation des projets de valorisation du CO₂ comme ce qui est fait dans les appels à projets Innovation Fund.

- **Mener un travail commun entre pouvoirs publics et acteurs de la filière de valorisation du CO₂, d'élaboration d'une vision stratégique du développement de la valorisation du CO₂ permettant d'identifier en priorité :**

- Des filières de valorisation du CO₂ conduisant à un stockage temporel le plus long possible ;

- Des systèmes technologiques les plus prometteurs en termes de réduction des émissions : usage de récupération de chaleur, d'électricité renouvelable, optimisation et intensification des procédés... ;
- Des développements ambitieux à amplifier et à prioriser autour des filières de valorisation du CO₂ biogénique ainsi que du CO₂ issu des procédés industriels ;
- Une vision territoriale au niveau des zones identifiées pour le développement du Captage et Stockage du CO₂ (CSC), mais aussi vers d'autres territoires par des coopérations entre industriels avec des émissions de CO₂ plus diffuses et de nouvelles possibilités de valorisation du CO₂, tout en veillant à inscrire ces projets en complément des actions de décarbonation « directes » de l'industrie : efficacité énergétique, décarbonation du mix énergétique, usage de nouveaux intrants alternatifs, décarbonation des procédés industriels... ;

- **Définir les conditions d'un soutien public permettant d'accélérer la concrétisation des projets les plus prometteurs :**

- Par le développement d'Indicateurs de Cycle de Vie facilitant la réalisation d'ACV, pour leur appropriation par le plus grand nombre de porteurs de projets et leur utilisation lors des candidatures aux différents dispositifs (ex : Innovation Fund, appels à projets ADEME, etc.) ;
- Par la poursuite des efforts de R&D via le soutien de démonstrateurs innovants permettant d'améliorer la performance des procédés et d'élargir les possibilités de valorisation du CO₂ (nouveaux produits) ;
- Par l'accompagnement au déploiement à l'échelle industrielle des projets matures de valorisation du CO₂ qui correspondent à ces exigences ;
- En tenant compte des évolutions des politiques publiques européennes (Directive EU ETS, Mécanisme d'Ajustement Carbone aux Frontières MACF, Carbon Contracts For Difference CCFD...) renforçant les produits bas carbone.

5 Adaptation des normes ISO 14040 à 14044 pour les voies de valorisation du CO₂ via l'établissement de guide méthodologique comme celui de la DG ENER : <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/LCA4CCU-March-2020-Release-v1-0.pdf>

6 https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/PEFCR_OEFSR_en.htm

1. CONTEXTE ET ENJEUX

1.1. VALORISATION DU CO₂ ET NEUTRALITÉ CARBONE

Lors de la révision de la Stratégie nationale bas carbone (SNBC)⁷, le captage et stockage géologique du CO₂ (CSC) a été identifié comme un levier de réduction des émissions de CO₂ (potentiel identifié à hauteur de 15 MtCO₂/an d'ici 2050). Néanmoins, le CSC fait face à des coûts élevés ainsi qu'à une opposition sociétale forte qui limitent le développement des projets. Dans ce contexte, la valorisation du CO₂ (CCU) comme matière première représente une autre voie choisie par certains acteurs industriels dans une logique d'économie circulaire pour réduire les émissions de CO₂, même si ce levier n'a pas été identifié dans la SNBC. Ce potentiel de valorisation doit toutefois tenir compte d'un certain nombre de paramètres qui sont discutés dans cet avis pour que la valorisation du CO₂ devienne pleinement une solution complémentaire au CSC.

La valorisation du CO₂ est aujourd'hui marginale notamment à cause de la faible maturité des technologies de valorisation du CO₂ (même si elles ne sont pas toutes au même stade). Dans une logique de soutien accéléré et d'ampleur à l'ensemble des leviers de décarbonation, il est important d'analyser les tenants de la contribution de la valorisation du CO₂ à la neutralité carbone pour bien orienter les Politiques Publiques et les acteurs de la filière.

RÉ-ÉMISSION ET CONTRIBUTION À LA NEUTRALITÉ CARBONE : SOUS QUELLES CONDITIONS ?

Dans la majorité des cas, le CO₂ utilisé sera réémis dans l'atmosphère lors de l'usage du produit (ex : combustion de carburant). Cependant, même dans ce cas, la valorisation du CO₂ peut permettre une réduction effective des émissions de CO₂. En effet, si nous prenons l'hypothèse simplificatrice d'une technologie de valorisation du CO₂ neutre en carbone, alors la valorisation du CO₂ permet d'utiliser le carbone deux fois. Un premier usage émet du CO₂ qui sera capté, et un second usage qui utilise le CO₂ capté pour une seule émission.

Sans la valorisation du CO₂, il y aurait deux émissions de CO₂ pour ces deux usages.

Cette réduction (partielle) d'émission sera d'autant plus effective que l'énergie utilisée dans la chaîne de captage et valorisation du carbone est renouvelable. L'enjeu du recours aux énergies renouvelables est donc double :

- Éviter de générer des émissions nouvelles (non existantes dans le schéma initial sans la valorisation du CO₂) liées à la consommation énergétique supplémentaire nécessaire au recours au CO₂ émis et capté comme matière première à la place d'une ressource en carbone fossile⁸.
- Permettre une réduction des émissions (par rapport aux émissions existantes dans le schéma sans la valorisation du CO₂) en remplaçant une énergie d'origine fossile utilisée initialement dans la production du produit de sortie, par une énergie renouvelable.

Par ailleurs, dans certains cas très particuliers, le CO₂ peut être immobilisé de manière permanente (minéralisation) et ainsi permettre une plus grande réduction d'émission de carbone.

Dans les pays avec un mix électrique carboné, le recours à la valorisation du CO₂, comme le recours au Power to gas ou liquid⁹, qui nécessite de fortes consommations électriques, est moins pertinent du fait de la plus faible réduction d'émissions de CO₂ attendue et du surcoût important des produits à base de carbone stocké comparé à celui des produits fossiles. Sur du long terme, au vu des potentiels d'utilisation du CO₂ (Figure 1), la valorisation du CO₂ pourrait jouer un rôle non négligeable de réduction des émissions de CO₂.

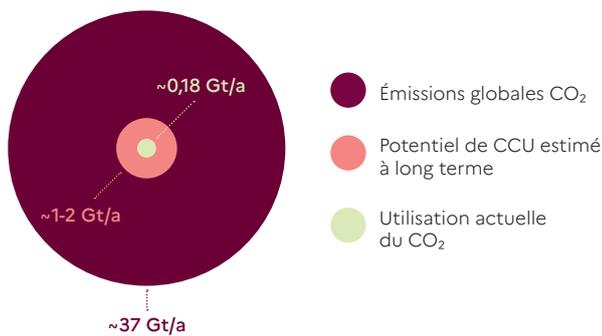
⁷ <https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

⁸ Toutes les émissions liées au nouveau système de valorisation de CO₂ doivent être prise en compte y compris les émissions indirectes et les émissions liées au cycle de vie

⁹ Le Power to gas ou liquid est une technologie de valorisation du CO₂ qui permet de produire du gaz de synthèse ou des carburants liquides de synthèse à partir d'hydrogène issu d'électrolyse et de CO₂.

FIGURE 1 : POTENTIEL MONDIAL D'UTILISATION DU CO₂ SUR LE LONG TERME

(EUROPEAN COMMISSION, 2018)
(UTILISATION ACTUELLE-HORS VOLUME CO₂ POUR EOR)



L'ENJEU DU CO₂ BIOGÉNIQUE DANS LE POTENTIEL DE CONTRIBUTION DE LA VALORISATION DU CO₂ À LA NEUTRALITÉ CARBONE

Une projection à long terme doit se faire dans un objectif de neutralité carbone. Aussi, tout le carbone valorisé via la valorisation du CO₂ et qui sera réémis (ce qui représente la majorité des cas) devra être compensé à l'échelle nationale ou mondiale. Le volume de carbone valorisé et temporairement stocké est donc aussi contraint par le potentiel d'émissions négatives. Comme celui-ci est limité pour des raisons techniques, économiques ou physiques (puits naturels), un choix devra être fait sur les émissions résiduelles que l'on pourra se permettre de conserver, étant compensées par les émissions négatives.

À noter que si le CO₂ capté est d'origine biogénique et si l'énergie utilisée dans toute la chaîne de valorisation du CO₂ est complètement décarbonée, le produit issu de la voie de valorisation du CO₂ sera lui-même globalement décarboné. Il s'agit en réalité d'un cas particulier de la compensation par des émissions négatives décrit ci-dessus, dans lequel l'émission négative est directement liée au captage de carbone. En effet, capter du carbone biogénique correspond à une émission négative égale à l'émission positive causée par sa réémission.

Ainsi, le procédé complet de captage, valorisation et réémission est alors neutre en carbone (sous réserve de l'élimination des émissions liées aux consommations énergétiques)¹⁰.

Le volume de valorisation du CO₂ à développer en France à horizon 2050 doit donc être déterminé en prenant en compte deux effets contraires :

- D'une part, la valorisation du CO₂ permet une réduction plus ou moins partielle des émissions de CO₂ valorisées
- D'autre part, les émissions liées à l'utilisation des produits des voies de valorisation du CO₂ doivent être compensées par des émissions négatives dont le potentiel est limité.

La détermination du volume cible de valorisation du CO₂ à 2050, résultant de l'équilibre entre ces deux effets, dépasse le cadre de cet avis. Mais s'il s'avère pertinent d'augmenter le volume de CO₂ valorisé, deux stratégies sont possibles :

- Augmenter le volume des usages déjà existants ;
- Développer de nouveaux usages. Parmi les nouvelles voies investiguées, la transformation chimique du CO₂ et la production des microalgues suscitent beaucoup d'intérêt. En plus de l'objectif de réduction des émissions de CO₂, d'autres bénéfiques pourraient être apportés par la valorisation du CO₂ comme la réduction de la dépendance aux hydrocarbures ou le développement de procédés moins toxiques.

Dans tous les cas, les voies de valorisation du CO₂ les plus performantes en termes de réduction d'émissions de CO₂ et de contribution à la neutralité carbone seront à privilégier. Ainsi, la valorisation du CO₂ peut participer aux objectifs de la neutralité carbone sous réserve d'utiliser de l'énergie renouvelable, de favoriser l'utilisation du CO₂ biogénique et en privilégiant la fabrication de produits avec un stockage temporel long du CO₂.

¹⁰ En première approximation sans comptabiliser les émissions indirectes

1.2. DESCRIPTION DES TECHNOLOGIES DE VALORISATION DU CO₂

Dans le monde, 230 MtCO₂ par an environ sont utilisées comme matière première (environ 80 % indirectement et 20 % directement) ce qui représente seulement 0,5 % du CO₂ émis annuellement. Les voies de valorisation du CO₂ sont classées selon trois types d'utilisation du CO₂ (ADEME, 2010), (Aresta, 2016):

- Utilisation directe du CO₂ pour ses propriétés physiques (par exemple en tant que solvant d'extraction dans l'industrie pétrolière, boissons gazeuses...);
- Utilisation par transformation chimique du CO₂ (voie la plus ancienne qui existe déjà, par exemple, synthèse de produits comme l'urée et les carbonates inorganiques à l'échelle industrielle, carbonatation...);
- Utilisation via la transformation biologique pour la synthèse de produits.

Ces trois types de transformation regroupent des utilisations historiques et d'autres plus récentes ou même en développement.

Pour alimenter le marché actuel, le CO₂ est récupéré sur des sources concentrées comme la production d'ammoniac ou extrait du sous-sol¹¹ (réservoir naturel de CO₂) car le coût est le plus faible. Si de nouveaux usages du CO₂ sont développés, en particulier en substitution aux produits fossiles, d'autres sources de CO₂ seront nécessaires. Les technologies de captage permettent d'accéder à des sources de CO₂ moins concentrées (ex : fumées issues d'incinérateurs, cimenteries...) mais le coût sera plus élevé. Ainsi, le coût du CO₂ capté sera plus une limite que la ressource en CO₂. Les paragraphes suivants ont pour but de décrire les technologies de valorisation du CO₂.

1.2.1. L'UTILISATION DIRECTE DU CO₂

Actuellement, le CO₂ est utilisé directement pour ses propriétés physiques, notamment pour la récupération assistée des hydrocarbures dans l'industrie pétrolière et qui représente une part importante (50 MtCO₂/an) (Figure 2). Dans ce cas, le CO₂ est injecté dans les réservoirs de pétrole pour augmenter la récupération des hydrocarbures de 10 à 30 % supplémentaire par rapport aux technologies d'extraction standards. Pour l'instant la plupart des projets utilisent du CO₂ d'origine naturelle (gisements de CO₂),

mais l'utilisation de CO₂ issu de fumées industrielles se développe notamment aux États-Unis et en Chine (ADEME, 2010). Cette utilisation du CO₂ pour l'industrie pétrolière n'existe pas en France.

Les autres utilisations directes du CO₂, qui représentent une part plus faible en volume, sont en tant que gaz inerte ou gaz réfrigérant (industries alimentaires) ou agent neutralisant (traitement de l'eau).

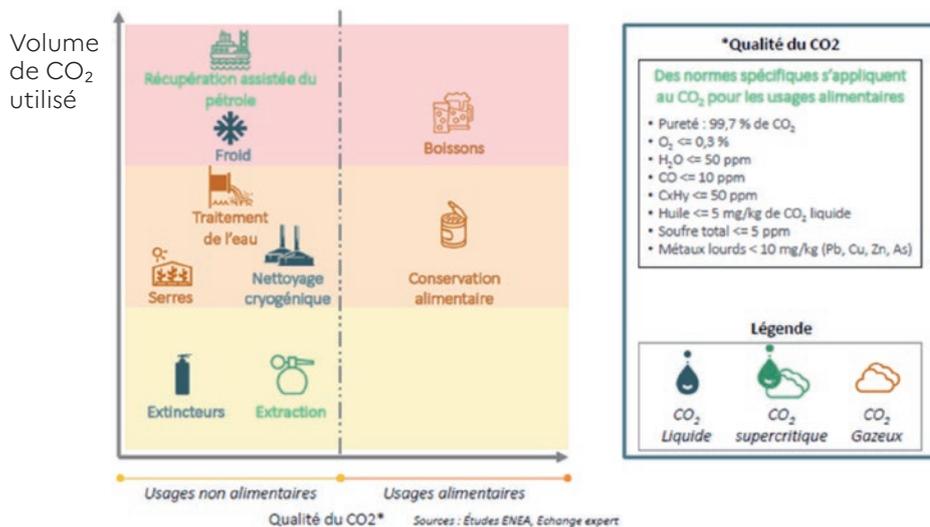


FIGURE 2 : LES USAGES DIRECTS DU CO₂ (CRÉDITS ENEA)

11 Ce n'est plus le cas en France depuis que la dernière source de CO₂ a été fermée en 2012 (Montmirail)

AVIS D'EXPERT

1.2.2. LA VALORISATION CHIMIQUE DU CO₂

L'utilisation chimique du CO₂ recouvre à la fois des usages existants en substitution aux hydrocarbures, et de nouveaux usages en cours de développement.

La **Figure 3** illustre comment le CO₂ peut être utilisé en substitution au fossile pour la synthèse de produits chimiques.

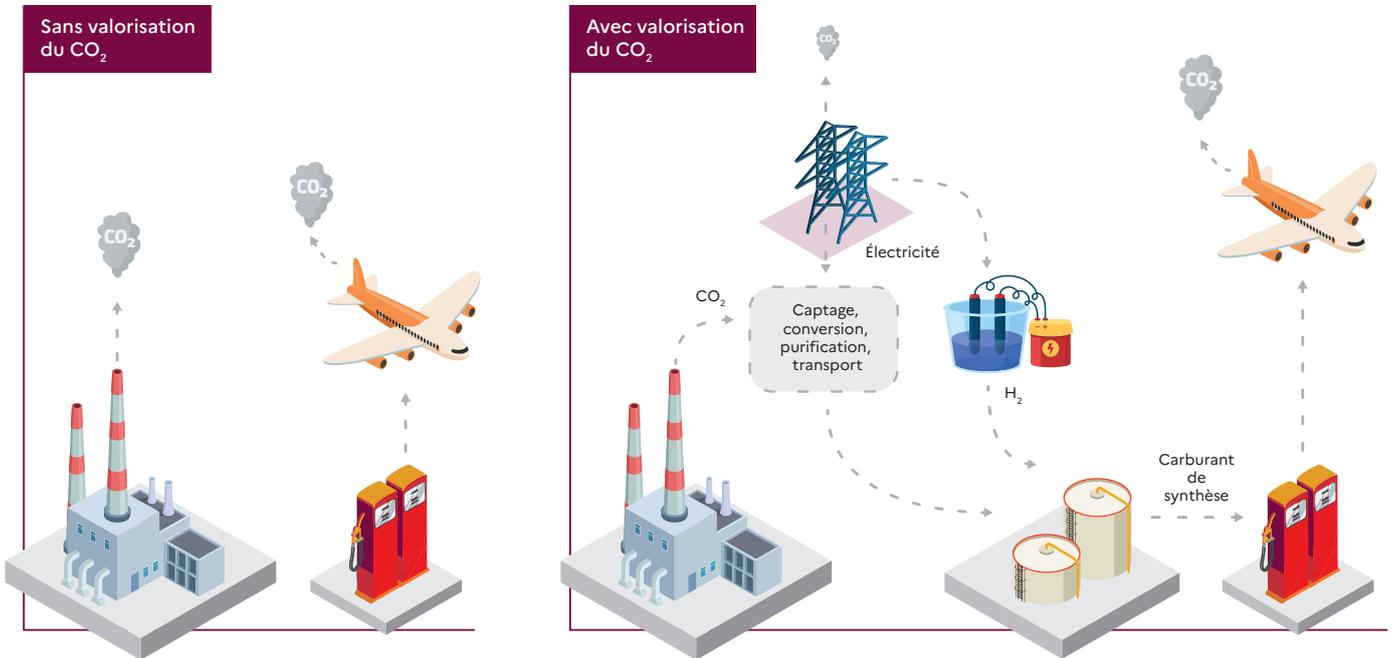
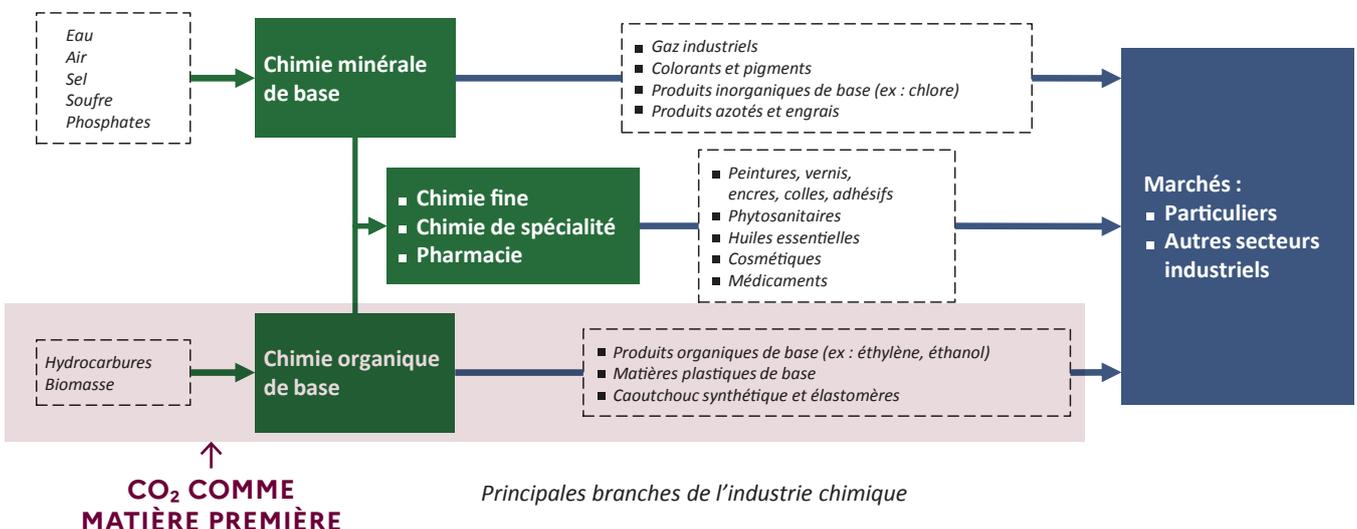


FIGURE 3 : SANS ET AVEC L'UTILISATION DU CO₂ COMME MATIÈRE PREMIÈRE: EXEMPLE DE LA VALORISATION DU CO₂ EN ÉLECTROCARBURANT

Ainsi l'utilisation du CO₂ comme matière première pour la fabrication de produits chimiques n'empêche pas la réémission du CO₂ lors de la fin de vie du produit. Pour réduire les émissions de CO₂ liées à la synthèse d'un produit chimique, il faut que l'énergie utilisée par le procédé soit renouvelable ou au moins décarbonée. Au vu de l'enjeu pour l'industrie chimique de développer des procédés avec de nouvelles matières pre-

mières en substitution aux hydrocarbures, la valorisation chimique du CO₂ est une voie très étudiée car elle pourrait permettre d'adapter les procédés actuels - en particulier dans la chimie organique de base - sans nécessité de les changer. La **Figure 4** montre les différentes branches de la chimie ainsi que les produits pour lesquels le CO₂ pourrait se substituer aux fossiles.



CO₂ COMME MATIÈRE PREMIÈRE

Principales branches de l'industrie chimique

FIGURE 4 : REPRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES BRANCHES DE LA CHIMIE ADAPTÉE DE (ENEA, 2015)

AVIS D'EXPERT

La principale difficulté en chimie est la très grande diversité des produits commercialisés. Il faut donc trouver une matière première en substitution au fossile capable de générer cette même diversité. La **Figure 5** représente les molécules qui peuvent être obtenues à partir du CO₂. **Ainsi un grand spectre de molécules peut être obtenu mais très peu de procédés sont commercialisés à l'heure actuelle. La grande majorité est encore au stade de la recherche ou de la démonstration.**

En plus du développement de nouveaux procédés, les technologies de CCU doivent surmonter deux autres difficultés :

- Le coût du captage (consommation énergétique élevée comme dans le cas du CSC) ce qui augmente le coût du CO₂ comme matière première;
- Le niveau de pureté du CO₂ requis.

En fonction des technologies développées (dépendant du procédé chimique et du catalyseur utilisé), le CO₂ doit être purifié jusqu'au grade alimentaire (99,99%) pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs. L'impératif de purification a un impact important sur le coût final du CO₂. C'est pourquoi des axes de recherche se focalisent sur l'utilisation du CO₂ capté sans purification en adaptant les procédés.

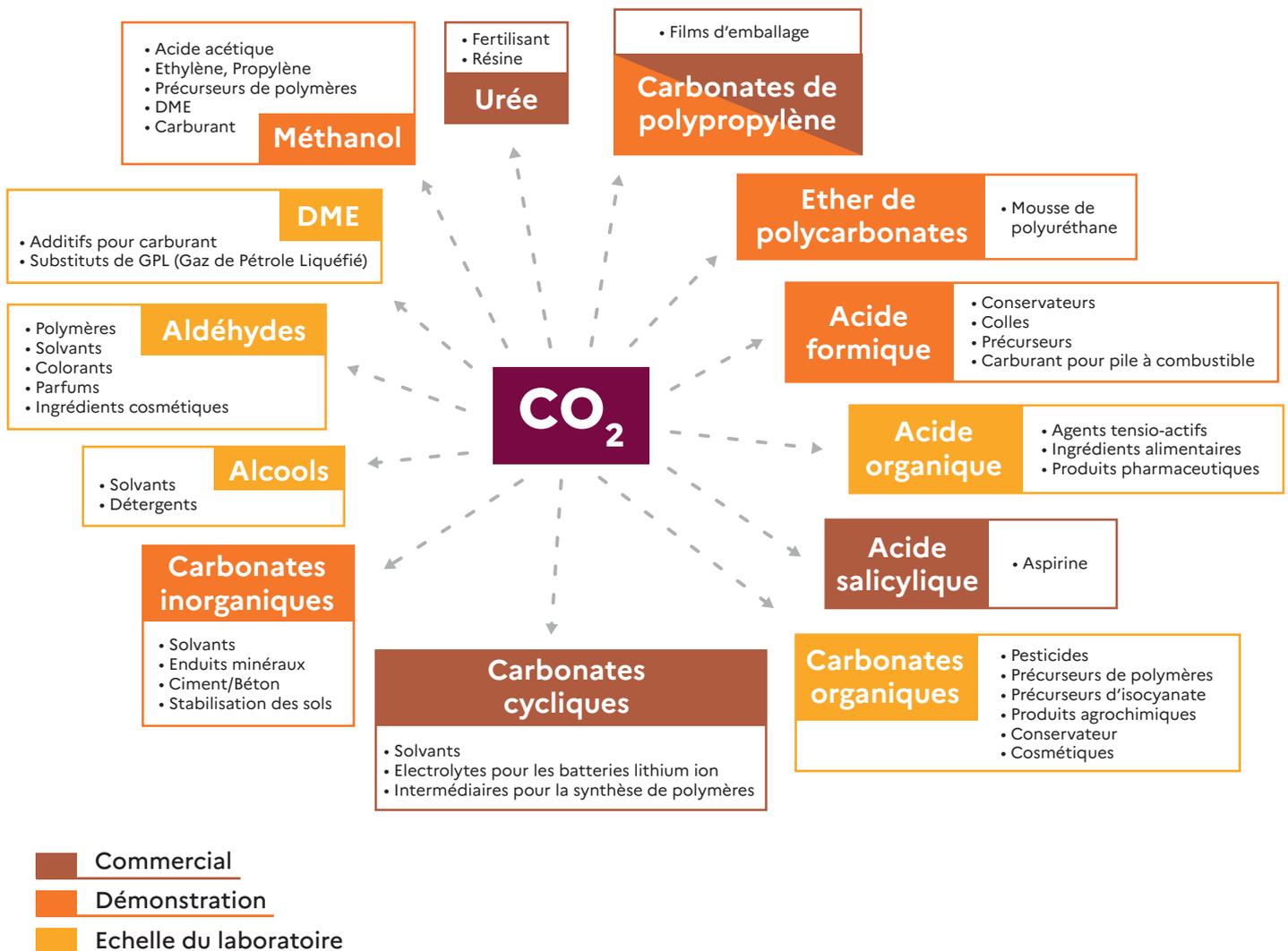


FIGURE 5: REPRÉSENTATION DES PRODUITS ISSUS DE LA VALORISATION DU CO₂ ET DE LEURS NIVEAUX DE MATURITÉ TECHNOLOGIQUE (IEA, 2019)

AVIS D'EXPERT

La transformation chimique d'une molécule de CO_2 se fait via l'utilisation de catalyseurs ou de molécules réactives et un apport important d'énergie (qui peut être sous forme de molécules, ex : H_2). Les réactions chimiques associées représentent un véritable défi car le CO_2 est inerte et donc ses transformations chimiques nécessitent une grande quantité d'énergie. Le développement de procédés permettant de synthétiser une molécule à fort intérêt à partir du CO_2 capté pourrait avoir un impact environnemental positif si cette molécule se substitue à l'équivalent fossile. La Figure 6 représente la demande d'énergie en fonc-

tion du produit cible (ADEME, 2014). Les différentes voies de synthèse sont représentées en fonction du degré d'oxydation du produit. Deux types de réactions sont visibles : les fonctionnalisations du CO_2 (en abscisse) où l'état d'oxydation du carbone reste le même, et la réduction du CO_2 (en ordonnée) qui amène à des molécules avec un état plus riche en énergie. Certaines voies permettent de combiner les deux types de réactions. Pour surmonter la barrière énergétique, de nombreux travaux de recherche sont en cours notamment pour augmenter les rendements associés à ces procédés (Olajire, 2013).

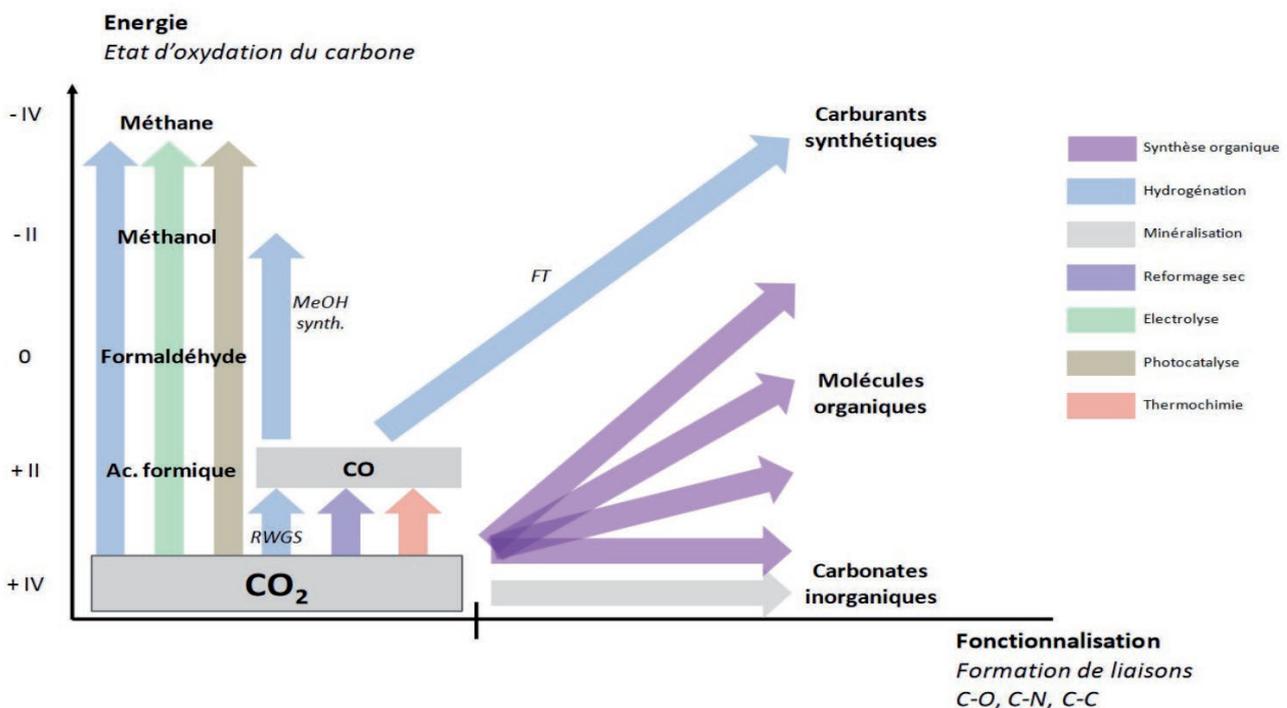


FIGURE 6 : PRINCIPE CHIMIQUE ET ÉNERGÉTIQUE DES DIFFÉRENTES FILIÈRES DE VALORISATION CHIMIQUE DU CO_2 (ADEME, 2014).

L'ÉNERGIE NÉCESSAIRE EST D'AUTANT PLUS ÉLEVÉE QUE L'ÉTAT D'OXYDATION EST FAIBLE.

1.2.3. LA VALORISATION BIOLOGIQUE DU CO_2

La valorisation biologique du CO_2 consiste en la transformation du CO_2 par un microorganisme vivant qui apporte l'énergie nécessaire à la transformation de la molécule de CO_2 . Les procédés biologiques développés majoritairement portent sur la production de biométhane via la méthanation biologique (conversion de l'hydrogène et du CO_2 par des microorganismes) ou la fermentation biologique pour la production de molécules d'intérêts (Figure 7). Une autre voie qui est

beaucoup investiguée est la production de microalgues. Cette biomasse algale est ensuite utilisée pour produire des produits à haute valeur ajoutée (polyols, polymères, iso cyanates, plastiques) ou des biocarburants. Le principal avantage est l'utilisation de l'énergie solaire par les microalgues et ainsi une consommation énergétique très faible. En revanche, le principal inconvénient est la faible consommation du CO_2 par les microalgues mais aussi la phase d'extraction des molécules (très énergivore). Plusieurs technologies ont

AVIS D'EXPERT

été développées : cultures en bassin fermé (photobioréacteur) ou en bassin ouvert (raceway). Les bassins en plein air ont l'avantage d'avoir un coût réduit comparé au photobioréacteur. Mais, ce mode de production nécessite l'utilisation de grands espaces pour une production à grande échelle.

La méthanation biologique et la production de microalgues sont les voies les plus avancées en termes de R&D comparées aux nouvelles voies en émergence (fermentation biologique).

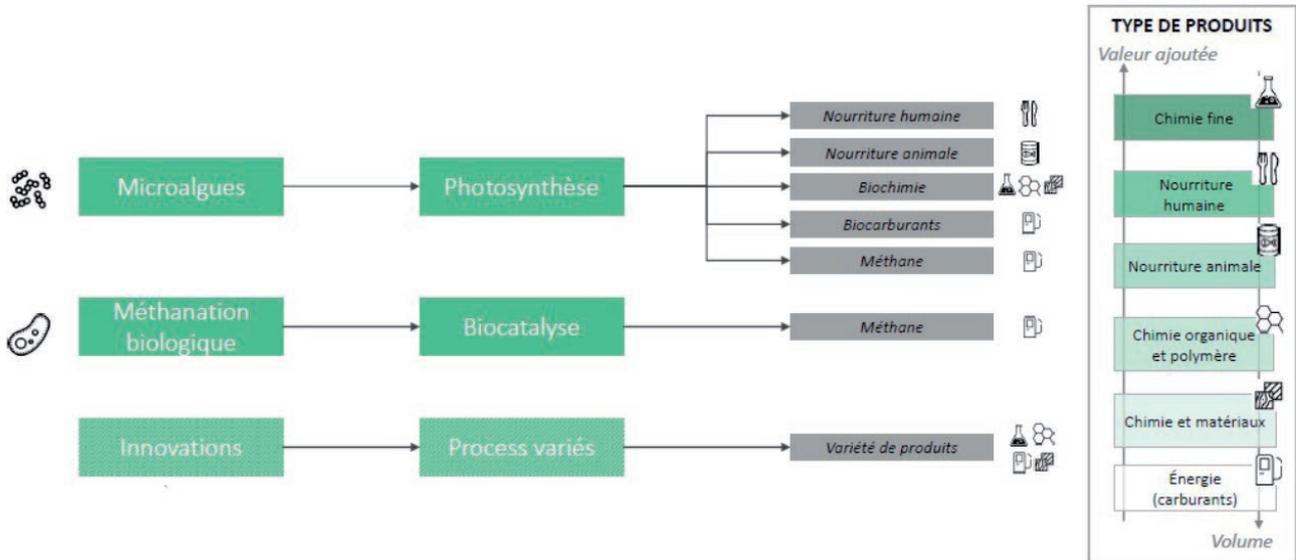


FIGURE 7 : SCHÉMA DES PRINCIPALES VOIES DE VALORISATION BIOLOGIQUES DU CO₂
(ENEA, ETUDE CO₂)

L'obtention des produits via la valorisation biologique pourrait prétendre à avoir l'étiquette de « vert » comme ils sont issus de la biomasse, mais ils sont aussi produits avec du CO₂ fossile. Donc seule une fraction du CO₂ peut être considérée comme biogénique,

l'autre partie est d'origine fossile. La question se pose alors sur la manière de comptabiliser l'empreinte carbone de ces produits. Le chapitre suivant discute de la méthodologie pour évaluer la réduction des émissions de CO₂ liées à la valorisation du CO₂.

2. DES POTENTIELS DE RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ COMPLEXES À APPRÉHENDER

2.1. TEMPS DE STOCKAGE DU CO₂ DANS LE PRODUIT

Les voies de valorisation du CO₂ sont variées et peuvent permettre le remplacement de produits fossiles et/ou le stockage permanent du CO₂ dans un produit. La durée de stockage du CO₂ dans le produit synthétisé doit être prise en compte dans l'analyse.

Ainsi en fonction de la nature du produit, la durée de stockage sera différente :

- produits énergétiques : de quelques heures à quelques jours
- produits chimiques : quelques jours à quelques mois voire années pour les plastiques
- matériaux « inertes » : permanent

La Figure 8 classe les différents produits en fonction de la durée de stockage du CO₂.

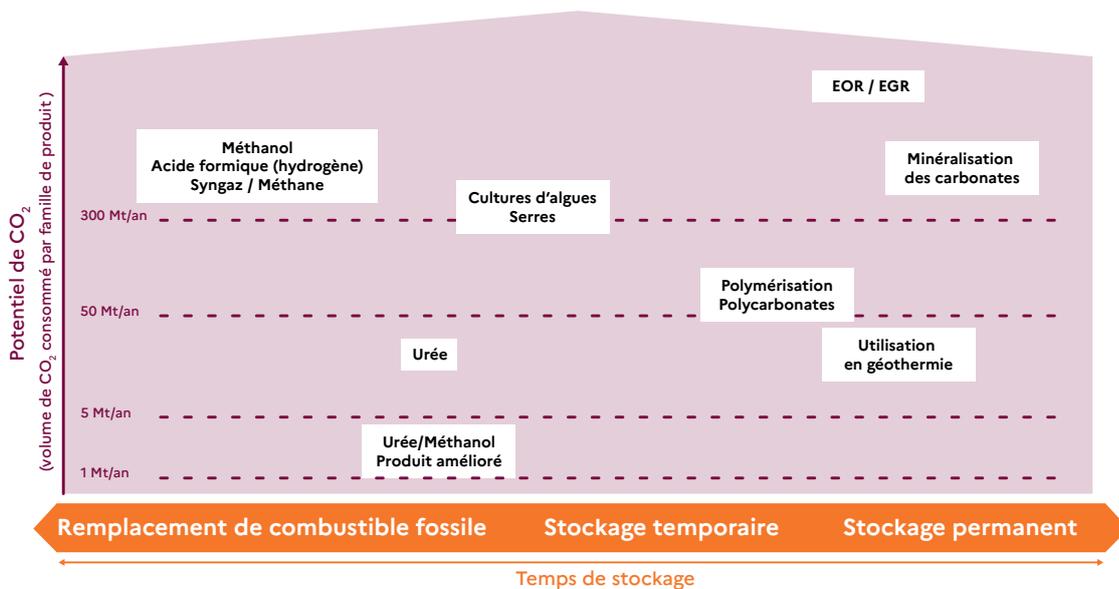


FIGURE 8 : DURÉE DE STOCKAGE DU CO₂ ET MARCHÉ POTENTIEL EN FONCTION DU PRODUIT ADAPTÉ DE (HENDRIKS, C., NOOTHOUT, P., & COOK, G., 2013)

L'EOR est représenté dans la figure comme du stockage permanent car le CO₂ est injecté dans le réservoir et considéré comme y restant stocké. Ici, ne sont pas

prises en compte les émissions de CO₂ liées à la récupération des hydrocarbures.

2.2. ÉVOLUTION DU CONTENU CARBONE DU PRODUIT SUBSTITUÉ

L'horizon de temps du déploiement de la technologie est également un point important de l'analyse, parce qu'il détermine la référence en termes de produit fossile substitué. Dans le cas de la substitution, le calcul du bénéfice se fait en considérant que le CO₂ capté remplace un produit fossile. Or dans le moyen terme et le long terme, cette hypothèse ne sera plus forcée-

ment valable. Par exemple, les carburants pourraient être remplacés par l'électromobilité et le gaz (BioGNV et H₂). Il faut donc faire l'analyse en fonction du service rendu (et de l'évolution de son contenu carbone dans le temps) et non du produit actuel, pour identifier les solutions les plus pertinentes à mettre en place.

2.3. À CHAQUE SOURCE DE CO₂ DES CONDITIONS DIFFÉRENTES IMPACTANT LA RÉDUCTION DE CO₂

2.3.1. SOURCE DE CO₂ D'ORIGINE FOSSILE

La principale barrière reste le coût comme pour le CSC. En effet, le coût du captage dépend de la concentration en CO₂ mais aussi du volume (impact sur le CAPEX). Plus le volume de CO₂ sera faible, plus le coût sera important. Le principal avantage de ces sources de CO₂ est qu'elles sont réparties sur tout le territoire. Cela peut faciliter le montage de projet de valorisation de CO₂ en fonction du lieu et du produit visé. Par contre, le transport reste une barrière importante, avec la question du développement ou non d'infrastructures de transport de CO₂, ce qui impose aux futurs projets de valorisation de CO₂ d'être proches de la source d'émissions.

LES GRANDS ÉMETTEURS

Dans le cas des grands émetteurs (ADEME, 2020) comme la sidérurgie, les cimenteries, une synergie entre les projets CSC et de valorisation du CO₂ peut être faite. Une partie du CO₂ capté peut être valorisée. Le principal intérêt est de réduire les coûts en mutualisant le captage, la purification et les infrastructures de transport. Par exemple, un projet CSC à Dunkerque prévoit d'utiliser une partie du CO₂ qui sera capté pour de la vente directe de CO₂ (100 ktCO₂/an) et l'utilisation de CO₂ pour la production de méthanol (200 ktCO₂/an), puis d'envoyer le reste (700 ktCO₂/an) pour du stockage en Mer du Nord pour son projet de démonstration (captage de 1 MtCO₂ sur les 8 MtCO₂ émises annuellement).

CAS DES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES SOUMISES À IMPACT SUR LA RÉGLEMENTATION SEQE (ETS)

Au niveau européen, les grands émetteurs (industriels et producteurs d'électricité) sont soumis au marché européen carbone SEQE (par la suite appelé marché ETS). Ils doivent chaque année mesurer leurs émissions et rendre autant de quotas que leurs émissions vérifiées. En particulier, l'industrie manufacturière bénéficie d'allocation de quotas gratuits. Si l'industriel émet moins d'émissions que le montant de son allocation gratuite, il bénéficie d'un surplus de quotas qu'il peut décider de revendre sur le marché. Si l'industriel émet plus d'émissions que le montant de son allocation gratuite, il doit acheter des quotas supplémentaires aux enchères ou à d'autres participants du marché ETS pour se mettre en conformité.

Dans la mesure où l'allocation des quotas gratuits va progressivement diminuer jusqu'en 2030, les installations classées ETS sont de fait incitées à réduire leurs émissions à la source (utilisation des EnR, efficacité énergétique...) ou les capter et les stocker (CSC).

Concernant plus particulièrement la valorisation du CO₂, elle n'est actuellement pas considérée comme une action de réduction des émissions. Ainsi les installations qui souhaitent valoriser leur CO₂ émis (exemple : vente à un autre industriel) doivent le comptabiliser dans leurs propres émissions (s'il n'est pas stocké de façon définitive) et rendre les quotas correspondants. L'utilisateur du carbone valorisé en revanche n'aura pas à comptabiliser ces émissions (si le carbone est rejeté dans l'atmosphère), car ce dernier aura déjà été comptabilisé par l'installation ETS à la source.

L'ENJEU DE LA COMPTABILISATION DE LA RÉDUCTION DES ÉMISSIONS PAR LA VALORISATION DU CO₂

Dans le cas de l'export du CO₂ vers un autre site, le CO₂ qui sera réutilisé dans un produit, même s'il est d'origine fossile, aura une empreinte carbone « neutre » car déjà comptabilisé par l'émetteur soumis à ETS. Cette proposition d'allocation ne permet pas de comptabiliser la réduction des émissions de CO₂ sur le périmètre de l'émetteur soumis à ETS. Aussi la question se pose sur la manière de comptabiliser le CO₂ évité sur le périmètre de la chaîne avale non soumis aux mêmes contraintes réglementaires.

Par exemple dans la Directive RED2¹², il a été ajouté la catégorie des carburants « recyclés ». Ainsi, le CO₂ capté d'une cimenterie, qui serait vendu pour la production d'électrocarburants, serait comptabilisé en émissions évitées par le secteur du transport utilisant ce nouveau carburant mais actuellement non comptabilisé dans l'objectif de pourcentage de renouvelable à incorporer dans le secteur des transports.

Dans ce cadre « normatif » pas complètement stabilisé, chaque acteur peut revendiquer une réduction des émissions de CO₂ par leurs actions (captage et valorisation de CO₂). Aussi, il paraît important de clarifier ces règles d'allocation pour éviter les double-comptages,

¹² <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043210190>

tout en veillant au caractère incitatif de ces critères d'allocation pour favoriser l'engagement de tous les acteurs de la chaîne de valeur concernée.

Dans le cadre des discussions actuelles sur le paquet « Fit for 55 », des changements règlementaires seront abordés lors de la révision de l'ETS et de la REDII concernant les « carburants recyclés ».

2.3.2. LE CO₂ BIOGÉNIQUE

Les utilisations de la biomasse conduisant à la réémission du CO₂ (chaudières biomasses, biocarburants...) peuvent constituer une source de CO₂ biogénique à valoriser. Le CO₂ biogénique étant considéré comme « neutre », le capter pour l'utiliser permet d'avoir une empreinte carbone plus faible que des produits à base de CO₂ d'origine fossile voire des empreintes carbone négatives en fonction du produit. L'une des sources privilégiées est la méthanisation qui produit un flux de CO₂ quasi pur. L'avantage est que les unités de méthanisation sont bien réparties sur le territoire. Pour les unités qui injectent le biométhane dans le réseau, le biogaz en sortie du méthaniseur doit être épuré pour en enlever le CO₂ (environ 50 % de CO₂ pour 50 % de biométhane en sortie de méthaniseur avant épuration) ce qui donne accès à du CO₂ quasi pur.

Au vu de la taille des unités de méthanisation, ces installations ne produiront que des petits volumes de CO₂ (quelques milliers de tonnes de CO₂/an) ce qui peut correspondre à des projets de power to gas (production de méthane de synthèse co-injecté avec le biogaz). Le CO₂ est généralement utilisé directement à proximité du lieu de la source (ex : injection dans les serres) pour optimiser encore plus les coûts.

Les chaudières biomasse peuvent représenter aussi une source intéressante de CO₂ biogénique. Cependant, au regard de la pénalité énergétique des technologies de captage, notamment à cause de la concentration du CO₂ dans les fumées (environ 10 %) et de la taille des chaudières (une grande majorité est inférieure à 1 MW), l'ajout d'une chaîne de valorisation du CO₂ peut augmenter significativement la consommation énergétique du système, et donc la consommation en biomasse.

2.3.3. LE CO₂ ATMOSPHÉRIQUE

Plusieurs systèmes de captage ont été développés pour récupérer le CO₂ de l'atmosphère et sont regroupés sous l'appellation Direct Air Capture (DAC). Il s'agit de technologies extrêmement énergivores (10 fois plus que les technologies de captage pour du CO₂ issu de fumées avec une concentration de 10 %) (JRC, 2019). En effet, le CO₂ étant à une concentration très faible (450 ppm environ soit une concentration de 0,045 %), une très grande quantité d'énergie est nécessaire pour extraire le CO₂ de l'air. Pour avoir un bénéfice en termes de réduction d'émissions de CO₂, l'énergie utilisée par ces systèmes doit être d'origine renouvelable sous peine d'augmenter les émissions de CO₂. Le DAC nécessite aussi une consommation importante en eau (le volume d'eau nécessaire est variable en fonction du procédé de captage employé). À ce stade, le développement de cette source de CO₂ pour la production de carburants ou d'autres produits à moyen-long terme (2035-2050) semble difficilement justifiable au vu des autres sources de CO₂ actuellement disponibles sous une forme plus concentrée, et des besoins d'améliorations des technologies de DAC. (von der Assen, 2016)

2.4. L'ACV DEPUIS LA SOURCE DE CO₂ JUSQU'À LA FIN DE VIE DES PRODUITS, POUR ÉVALUER LES BÉNÉFICES/IMPACTS DU CCU

Au vu des complexités précédemment décrites, il est essentiel d'évaluer le système dans son ensemble pour être capable d'identifier le réel bénéfice de ces nouvelles technologies, c'est-à-dire sur l'ensemble du cycle de vie : de l'extraction des ressources à la fin de vie du produit (« cradle to grave » ou du « berceau à la tombe ») d'un point de vue environnemental, économique et social.

La Figure 9 montre les différentes briques qui sont impliquées dans les technologies de conversion du CO₂ : source de CO₂ (CO₂ d'origine fossile, biogénique ou atmosphérique), origine de l'énergie, les co-réactifs, le procédé de conversion et le devenir des produits à base de CO₂. Le point important à noter est que l'évaluation des technologies de valorisation du CO₂ est très dépendante de la source d'énergie utilisée, vu que ces technologies sont très énergivores.

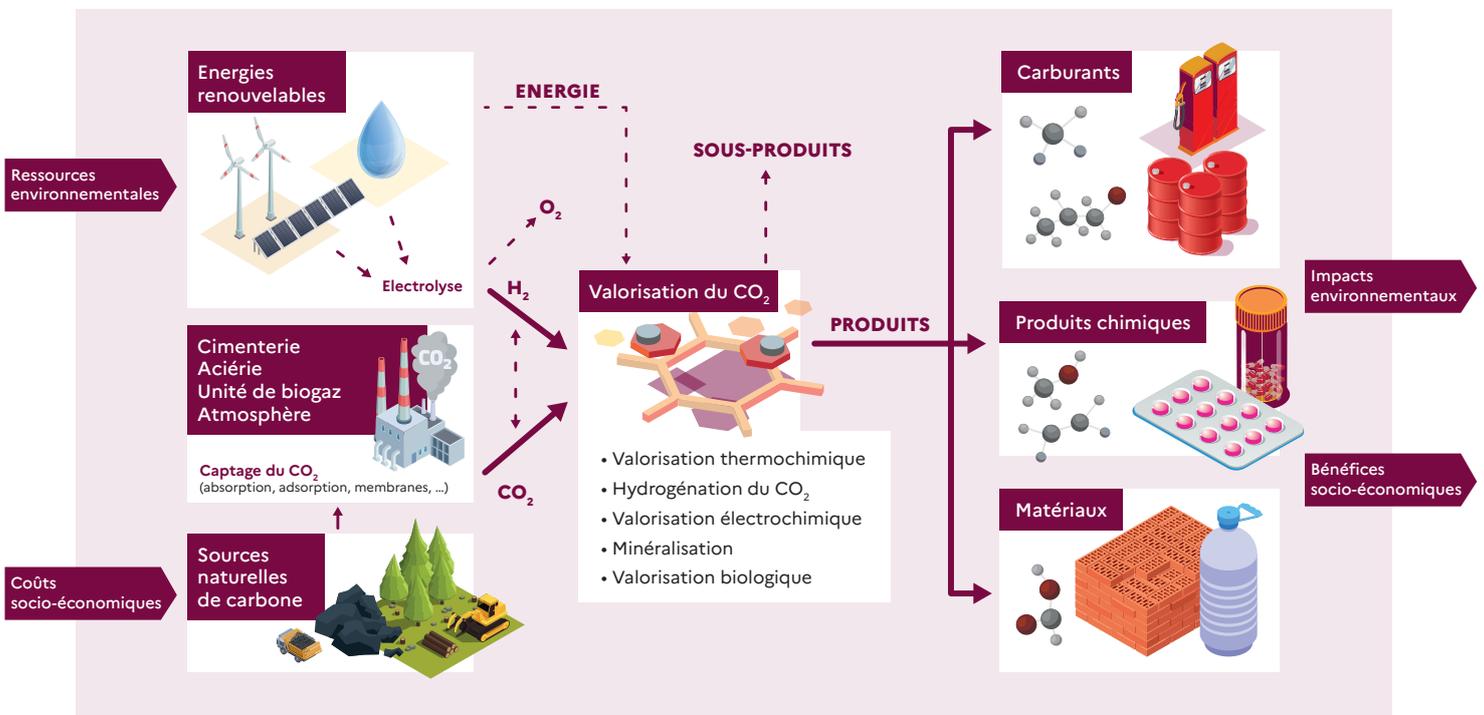


FIGURE 9 : SCHEMA DÉCRIVANT LES INTRANTS ET PRODUITS ISSUS DE LA VALORISATION DU CO₂ (SAPEA, 2018)

Les principaux points de vigilance pour l'application de l'ACV aux technologies de valorisation du CO₂ sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 1) en fonction de la famille de produits.

Ainsi, bien que l'impact CO₂ reste prédominant dans les échanges autour du développement de la valorisation du CO₂, l'indicateur GWP (PRG en français) d'un

procédé de valorisation du CO₂ ne doit pas être le seul indicateur de l'analyse de cycle de vie (ACV).

Les impacts sur les différents indicateurs environnementaux doivent être pris en compte dans l'analyse de cycle de vie pour s'assurer que l'indicateur nommé changement climatique ne soit pas amélioré au dépend d'autres indicateurs environnementaux (SAPEA, 2018).

TABLEAU 1 : PRINCIPAUX POINTS DE VIGILANCE SUR L'UTILISATION DE MÉTHODES ACV SELON LES PRODUITS OBTENUS

	Produits chimiques	Matériaux	Carburants
Périmètre	Du berceau à la tombe	Du berceau à la tombe	Du berceau à la tombe
Fonctionnalité	Multifonctionnel en considérant l'unité fonctionnelle de l'émetteur et du procédé de valorisation du CO ₂ ou Allocation (économique de préférence)	Multifonctionnel en considérant l'unité fonctionnelle de l'émetteur et du procédé de valorisation du CO ₂ ou Allocation (économique de préférence)	Multifonctionnel en considérant l'unité fonctionnelle de l'émetteur et du procédé de valorisation du CO ₂
Indicateurs d'impacts	GWP Consommation d'eau Consommation des ressources Impacts sur les sols Déplétion des ressources fossiles	GWP Consommation d'eau Consommation des ressources Impacts sur les sols Déplétion des ressources fossiles	GWP Consommation d'eau Consommation des ressources Impacts sur les sols Déplétion des ressources fossiles
Système de référence (actuel et futur)	Produits pétrosourcés Puis produits biosourcés	Béton + matériaux alternatifs (bois...)	Carburants fossiles+ carburants alternatifs (H ₂ , BIOGNV et biocarburant)
Données d'arrière-plan	Pas d'ICV pour les technologies de captage (encore au stade de développement avec des enjeux de secret industriel) : nécessite de l'inclure dans le périmètre de l'ACV	<ul style="list-style-type: none"> • Inclure la brique captage dans le périmètre de l'analyse • Le CO₂ n'est pas l'intrant limitant mais le co-réactant utilisé (déchets du BTP ou minéraux) : vigilance sur les données utilisées si ce n'est pas inclus dans le périmètre d'analyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Inclure la brique captage dans le périmètre de l'analyse • Electricité (mix de production actuel et futur)

Le choix du périmètre de l'ACV est déterminant dans l'évaluation des impacts. Il est recommandé de faire une ACV sur le périmètre le plus large possible. Par exemple, si le CO₂ provient d'une usine de sidérurgie, il faut inclure le procédé source de CO₂ de l'usine et son captage dans le périmètre de l'analyse et s'appuyer sur des données spécifiques d'Inventaire de Cycle de vie (ICV). En effet, les données génériques d'ICV actuelles ne sont pas assez précises, ou sont inexistantes, notamment sur la brique « captage ».

L'intérêt est ainsi de limiter le recours aux données génériques pour des briques essentielles, en particulier celles concernant l'étape de captage, qui ont forcément un impact sur le résultat de l'ACV. Actuellement, il n'existe pas de données d'inventaire de cycle de vie spécifiques aux technologies de captage de CO₂ ce qui renforce la faible fiabilité de l'usage de données génériques. Réaliser des ACV intégrant explicitement la brique captage conduira les acteurs à établir ces données de façon plus spécifiques.

AVIS D'EXPERT

Le schéma simplifié (**Figure 10**) montre comment en prenant des périmètres différents et donc en utilisant des données différentes d'ICV (spécifiques versus génériques), on obtient des résultats d'ACV différents pour le même procédé /produit évalué :

- Cercle bleu : données spécifiques sur le procédé de valorisation uniquement et utilisation d'une donnée générique pour le CO₂ capté entrant ;
- Cercle rouge : données spécifiques sur le procédé de valorisation + captage de CO₂ et utilisation de données génériques pour le CO₂ émis entrant ;
- Cercle vert : données spécifiques sur le procédé de valorisation + captage de CO₂ + émetteur de CO₂.

En conclusion, la valorisation du CO₂ englobe une grande variété de produits et de procédés allant des carburants aux produits du BTP. Il est donc difficile de se positionner sur les bénéfices de la valorisation du CO₂ sans rentrer dans le détail des procédés et de l'usage des produits. Une méthodologie cohérente et unifiée d'évaluation environnementale doit être utilisée pour les différents produits/technologies de CO₂ en prenant en compte la source de CO₂ et la partie captage. Ainsi une ACV globale permettrait d'évaluer au mieux les bénéfices/impacts environnementaux d'une nouvelle voie de valorisation du CO₂.

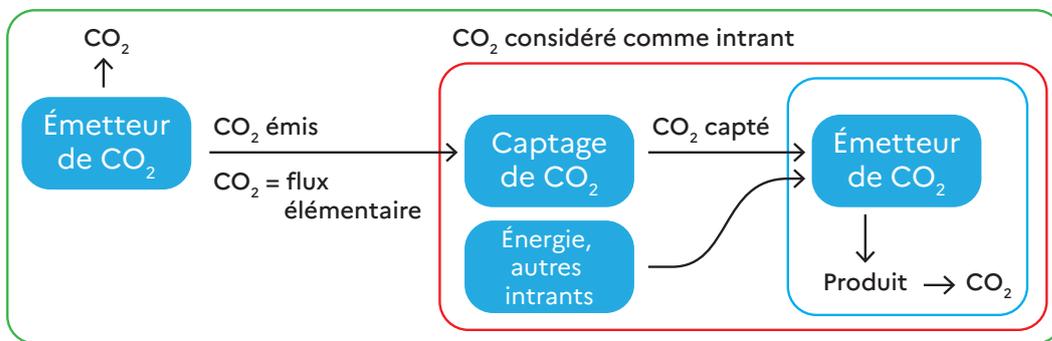


FIGURE 10 : SCHÉMA SIMPLIFIÉ DES PÉRIMÈTRES POSSIBLES D'UNE ACV POUR LA VALORISATION DU CO₂

Parmi les différentes familles de produits, la famille des matériaux carbonatés semble représenter le plus grand potentiel en termes de réduction des émissions de CO₂ à l'échelle mondiale. L'AIE a classé les produits à base de CO₂ avec le plus fort potentiel en termes d'impact sur le climat (par ordre décroissant) (**Figure 11**) :

- Matériaux à partir de CO₂ + agrégats : potentiel le plus important du fait que le CO₂ est immobilisé de manière permanente (1 à 5 GtCO₂ valorisés /an) mais encore peu mature
- Produits chimiques
- Carburants si déploiement à très grande échelle

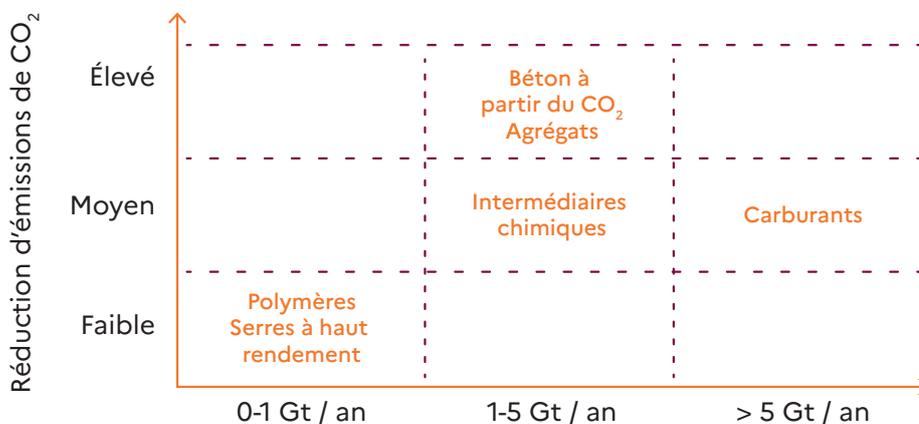


FIGURE 11 : POTENTIEL D'UTILISATION D'ÉMISSIONS DE CO₂ ET ENJEUX DE RÉDUCTION (IEA, 2019)

AVIS D'EXPERT

En plus des aspects environnementaux, il faut prendre en compte les aspects économiques de ces nouvelles technologies sur le même périmètre de l'analyse environnementale. Pour le potentiel économique, comme pour le potentiel environnemental, il est difficile à évaluer car les marchés visés sont variés et peuvent être amenés à disparaître ou à évoluer. Par exemple, les carburants pourraient être remplacés par l'électromobilité et le gaz (BioGNV et H₂).

Pour l'industrie chimique, il a été identifié le volume de CO₂ maximum qui pourrait être utilisé si tous les produits étaient remplacés par les « CO₂-produits » (Figure 12). Le méthane (ici considéré comme intermédiaire chimique) représente le plus grand volume en terme d'utilisation du CO₂. Or le CO₂ est immobilisé de manière temporaire dans ces molécules donc le bénéfice en termes de changement climatique sera limité même si ces produits remplacent les produits conventionnels (fossiles).

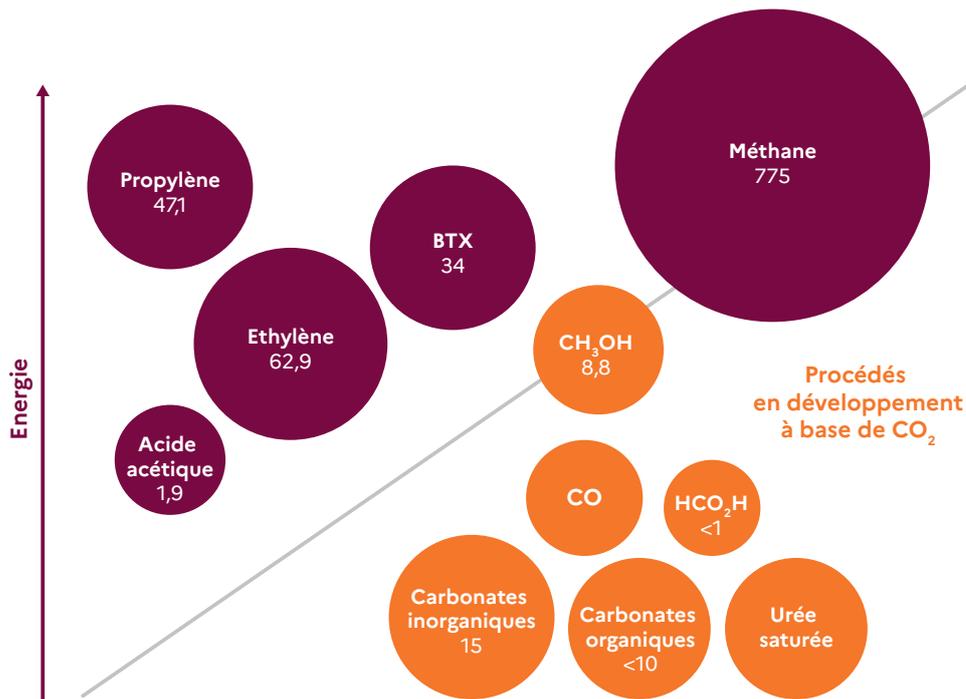
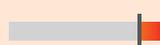
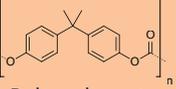


FIGURE 12 : POTENTIEL MAXIMUM DE L'UTILISATION DU CO₂ EN PRODUITS CHIMIQUE AU NIVEAU EUROPÉEN. LES CHIFFRES REPRÉSENTENT L'ÉQUIVALENT EN VOLUME DE CO₂ NÉCESSAIRE POUR LA PRODUCTION POUR COUVRIR LA CONSOMMATION DE L'ÉQUIVALENT EN PRODUITS CHIMIQUES EN EUROPE, EN MTCO₂/AN (SAPEA, 2018)

Ainsi, l'évaluation des voies de valorisation du CO₂ peut se faire via les procédés, comme ce qui a été décrit dans la partie 1, mais elle peut aussi être envisagée du point de vue produit, comme le permettent les approches ACV avec les recommandations du présent chapitre 2. Cette approche a pour but d'identifier les

produits qui pourraient avoir un potentiel en termes de réduction d'émissions de CO₂ mais également en termes de pénétration du marché. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des familles de produits issus de CO₂.

TABLEAU 2 : RÉSUMÉ DES PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DES FAMILLES DE PRODUITS ISSUS DE LA VALORISATION DU CO₂

Principaux usages	Type de procédé	Maturité technologique	Sources du CO ₂	Demande en énergie	Potentiel marché	Potentiel en termes de réduction de CO ₂
Carburants synthétiques Exemples :  Power to liquid carburant	Transformation chimique	Échelle démonstrateur	CO ₂ fossile ¹³		++	
	Transformation biologique	Échelle laboratoire	CO ₂ biogénique ¹⁴		+++	
			CO ₂ atmosphérique		+	
Produits chimiques Exemples : C_2H_4 Ethylène  Polycarbonate	Transformation chimique	En fonction du produit : échelle allant du laboratoire à l'unité commerciale	CO ₂ fossile ¹³		+++	
			CO ₂ biogénique ¹⁴		++++	
			CO ₂ atmosphérique		+	
Produits carbonatés Exemples :  Béton préfabriqué contenant du CO ₂	Transformation chimique	Échelle laboratoire à pilote	CO ₂ fossile ¹³		++	
			CO ₂ biogénique ¹⁴		+++	
			CO ₂ atmosphérique		+	

C'est cet angle de vue qu'il a été choisi de préciser dans le chapitre 3 pour évaluer d'un point de vue technologique, environnemental et économique les principales familles de produits issus du CO₂.

¹³ Dépendant du type d'émissions industrielles et de la concentration de CO₂

¹⁴ Dépendant du procédé de transformation de la biomasse et de la concentration de CO₂

3. CARACTÉRISATION DES PRINCIPALES FAMILLES DE PRODUITS ISSUS

3.1. LES CARBURANTS SYNTHÉTIQUES OU ÉLECTROCARBURANTS : DE NOMBREUSES EXIGENCES POUR S'ASSURER DE RÉPONDRE À L'ENJEU CLIMATIQUE

+ Avantages	- Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● Mobilité : Possibilité de continuer à utiliser les infrastructures existantes, contrairement à la mobilité électrique ou hydrogène ; ● Des composés « électrocarburant » pouvant être utilisés pour d'autres usages que la mobilité: industries, production de chaleur, production d'électricité 	<ul style="list-style-type: none"> ● Réémission directe du CO₂ dans l'atmosphère ● Besoin important en énergie renouvelable (EnR) car la molécule CO₂ est stable thermodynamiquement ● Verrous technologiques à lever, en particulier pour l'électro-réduction directe du CO₂ en méthanol ● Grande consommation en eau et rendement énergétique global de la chaîne en lien avec la production d'hydrogène via l'électrolyse de l'eau

3.1.1. LES PRINCIPALES FILIÈRES DE PRODUCTION D'ÉLECTROCARBURANTS : MÉTHANOL ET MÉTHANE

Les carburants liquides ont le principal avantage d'avoir une grande densité énergétique, d'où leur fort développement historique et l'existence de nombreuses infrastructures. C'est dans cette logique de substitution « directe » que l'on assiste à un **fort développement de nouveaux procédés pour la synthèse de carburants liquides synthétiques qui pourraient remplacer les carburants liquides fossiles et jouer un rôle aux côtés des biocarburants.**

DIFFÉRENTS PROCÉDÉS POUR DIFFÉRENTS CARBURANTS LIQUIDES

Les carburants liquides de synthèse sont obtenus à partir de CO₂ et d'H₂. Il s'agit d'une des voies de valorisation du CO₂ utilisant des procédés électrochimiques. Parmi les différents procédés en développement, la voie Power to Liquid (P2L) permet de produire des carburants de synthèse, appelé « électrocarburant » ou « e-fuels ». De nombreux projets sont en cours, au stade pilote ou démonstrateur mais il n'existe pas encore d'unité à l'échelle industrielle. Parmi les produits cibles, le méthanol est celui qui est le plus étudié (IEA, 2019). Le méthanol peut ensuite servir d'intermédiaire pour la production de carburants liquides (diesel, diméthylether...) ou être utilisé directement comme carburant.

Il existe trois voies :

- Le méthanol est obtenu par hydrogénation du CO₂ avec de l'hydrogène obtenu lui-même par électrolyse.
- Le méthanol peut également être synthétisé à partir du méthane, lui-même obtenu par méthanation du CO₂. À noter que le méthane de synthèse peut aussi être utilisé directement comme carburant gazeux en injection réseau.
- L'électro-réduction **directe** du CO₂ en méthanol à partir d'H₂O sans passer par l'hydrogène.

Ces différentes briques technologiques de production du méthanol ne sont pas toutes au même niveau de maturité (IEA, 2019). Et c'est la 3^e voie qui semble la plus prometteuse, bien qu'encore à l'échelle laboratoire, en matière de réduction des consommations d'énergie car elle permet d'éviter l'étape de production de l'hydrogène. En effet, entre 45% et 60 % de l'électricité utilisée pour la production des carburants synthétiques est perdue pendant les différentes étapes dont la plus importante est l'étape de production d'hydrogène (IEA, 2019).

Par ailleurs, une autre voie n'utilisant pas le méthanol, est aussi en développement pour produire des carburants synthétiques type gazole ou kérosène. L'objectif est de substituer le carburant fossile du secteur aérien par des électrocarburants (e-kérosène). Le procédé développé combine deux briques technologiques :

AVIS D'EXPERT

- Production de syngaz (mélange CO_2/H_2) à partir de CO_2 en présence de H_2O ,
- Suivie de la synthèse des carburants à partir du procédé de Fischer-Tropsch¹⁵.

La brique pour la production de syngaz a été démontrée à l'échelle pilote. La brique Fischer-Tropsch est mature industriellement. En Allemagne, la compagnie Sunfire a mis au point un démonstrateur produisant du e-crude (diesel synthétique) à partir de CO_2 atmosphérique et d'hydrogène électrolytique (Sunfire, projet Kopernikus).

LE POWER TO GAS

En amont du développement des carburants liquides, le power-to-gas a d'abord été investigué via de nombreux pilotes ou démonstrateurs. Il s'agit de la synthèse du méthane à partir de CO_2 et d' H_2 via la combinaison de la brique H_2 électrolytique suivi de la réaction de méthanation (ADEME, 2014). En France, plusieurs projets de démonstration ont été réalisés. Par exemple, le projet Jupiter 1000¹⁶, coordonné par GRTgaz, a pour objectif de produire du gaz de synthèse via la combinaison de différentes briques :

- Électrolyseur pour la production d'hydrogène en fonctionnement intermittent,
- Réacteur de méthanation innovant pour la réaction du CO_2 avec l' H_2 . Il est prévu de capter le CO_2 sur un émetteur industriel pour ensuite injecter le méthane produit dans le réseau de transport de gaz.

Le **Figure 13** résume tous les produits qui peuvent être obtenus via les voies de power to gas, power to liquid et même power to heat (production de chaleur à partir de l'électricité). Le développement de ces technologies a pour but de répondre à l'intermittence des renouvelables et à l'absence de moyens de stockage long terme de l'électricité excédentaire.

À travers l'Europe, pour l'ensemble de ces technologies, de nombreux pilotes ou démonstrateurs de production de méthanol et de méthane ont été construits (consommation de quelques centaines à des milliers de tonnes de CO_2/an), mais la majorité de ces démonstrateurs sont focalisés sur la production de méthane de synthèse y compris pour un usage en injection réseau. **Il reste donc à amplifier le développement des technologies de production de méthanol, en particulier l'électro-réduction directe.**

Par ailleurs, les technologies de production d'autres composés synthétiques issus du CO_2 comme l'acide formique, le diméthyléther (DME), l'éthanol ou le butanol, qui sont utilisés comme intermédiaires pour la production de carburants, sont moins matures technologiquement, notamment en Europe.

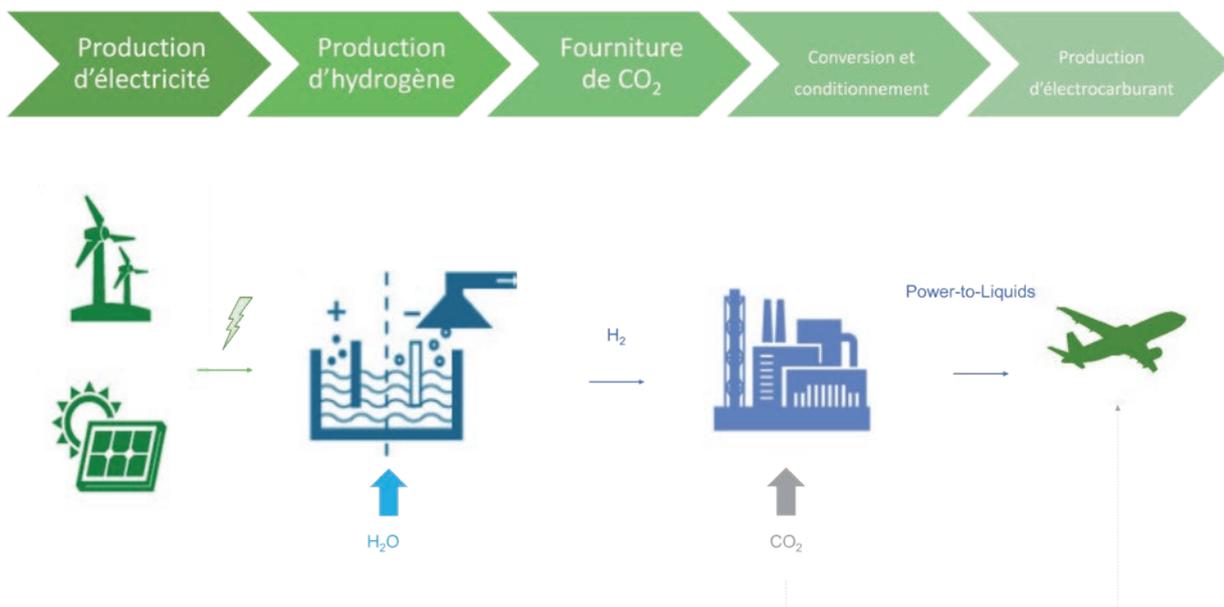


FIGURE 13 : SCHÉMA GÉNÉRAL DE LA PRODUCTION D'ÉLECTROCARBURANT PAR LE POWER-TO-LIQUIDS ADAPTÉ DE (GERMAN ENVIRONNEMENT AGENCY, 2016)

¹⁵ La réaction de Fischer-Tropsch consiste en une réaction chimique catalysée qui synthétise des hydrocarbures à partir du syngaz (monoxyde de carbone et hydrogène).

¹⁶ <https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/1894-jupiter1000.html>

AVIS D'EXPERT

3.1.2. LES BÉNÉFICES ENVIRONNEMENTAUX DES CARBURANTS À PARTIR DE CO₂ : SOUS QUELLES CONDITIONS ?

Les voies de valorisation du CO₂ nécessitent une quantité importante en énergie du fait que le CO₂ est une molécule stable thermodynamiquement. La production de carburants est la voie nécessitant le plus d'énergie (voir **Figure 6**). Cette énergie est apportée sous forme d'hydrogène. **Pour avoir un bénéfice en termes de réduction de GES, cet hydrogène doit provenir d'une électrolyse à partir d'électricité décarbonée, ce qui exclut les schémas avec de l'hydrogène fossile obtenu par vaporeformage.**

Ainsi la production de méthanol conduit à une réduction de 0,5 à 1 tCO₂ eq/tMeOH soit 74 % à 93 % (IEA, 2019) des émissions de CO₂ par rapport à la voie conventionnelle de production du méthanol fossile.

Pour le méthane de synthèse, en prenant des hypothèses favorables (électricité renouvelable et récupération de la chaleur), la réduction est plus faible, **entre 0,03 à 0,05tCO₂eq/MWh de méthane soit 54 % à**

87 % par rapport à la voie conventionnelle (méthane fossile). Il s'agit d'une estimation qui se base sur les hypothèses les plus optimistes et en substitution au carburant fossile. 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 ou de NOx.

Pour cette voie de valorisation, le volume de CO₂ consommé dans le procédé sera réémis lors de la combustion de l'électrocarburant. Ainsi le CO₂ est stocké de manière temporaire dans le procédé (de quelques heures à quelques jours). La **Figure 14** compare un système avec la valorisation du CO₂ et sans la valorisation du CO₂. La réutilisation du CO₂ d'origine fossile comme source de carbone pour la production de carburant permet de réduire les émissions de CO₂ en remplaçant des carburants fossiles. Il est estimé une réduction maximum en termes de CO₂ émis de 50 %, si on considère que l'énergie utilisée dans le procédé CCU est renouvelable en se basant sur la comparaison des périmètres de la **Figure 14**.

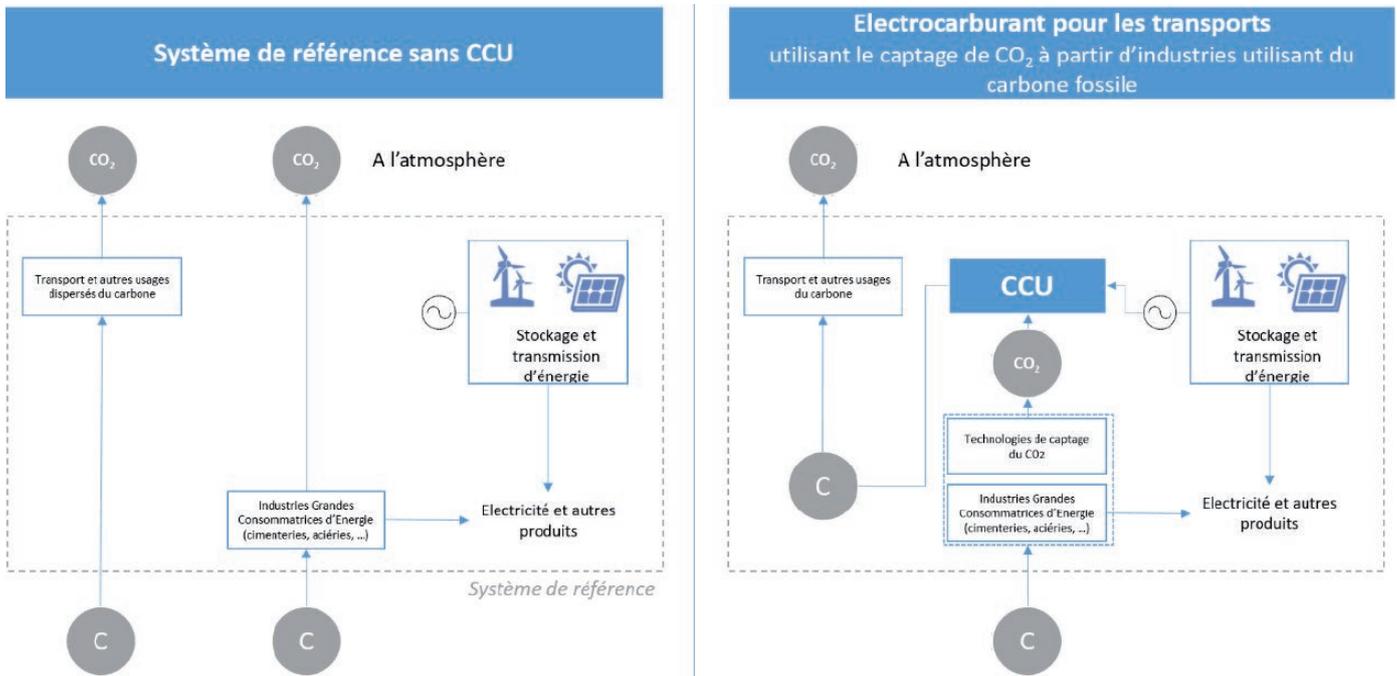


FIGURE 14 : COMPARAISON DU POTENTIEL DE RÉDUCTION D'ÉMISSIONS DE CO₂ D'UN SYSTÈME AVEC LA VALORISATION DU CO₂ ET SANS LA VALORISATION DU CO₂ (ICI PRODUCTION DE CARBURANT) ADAPTÉ DE (SAPEA, 2018)

AVIS D'EXPERT

Ainsi, un déploiement massif des électrocarburants pour une réduction effective des émissions de gaz à effet de serre engendrerait une consommation d'électricité renouvelable supplémentaire importante (50 % de l'électricité utilisée est perdue dans les procédés de conversion en carburants). **Un développement massif de l'électricité renouvelable est donc indispensable pour le déploiement des carburants synthétiques.**

Par ailleurs le temps de ce déploiement doit être pris en compte car il pose la question du choix du système de référence. Quels seront les carburants à substituer quand le développement des énergies renouvelables permettra une production massive des « électrocarburants » ? Les carburants synthétiques ne doivent donc pas être comparés aux carburants fossiles actuels mais au mix énergétique futur des transports, comprenant les autres types de mobilités en cours de développement (électromobilité, mobilité hydrogène et biocarburants). Les électrocarburants doivent donc s'inscrire dans ce mix énergétique futur, qui doit lui-même également intégrer les considérations sur les évolutions de trafic dans les décennies à venir.

3.1.3. UN SURCÔÛT ÉLEVÉ MÊME AVEC DES INFRASTRUCTURES TRANSPORT EXISTANTES

D'un point de vue économique, la principale référence pour comparer le coût de production des électrocarburants reste les carburants fossiles. Les carburants synthétiques ont un coût de production très élevé par rapport à leurs homologues fossiles. Par exemple, pour le méthane de synthèse, le prix est 10 fois celui du gaz naturel et pour le méthanol à base de CO₂, le prix est 4 fois celui du méthanol fossile (IEA, 2019).

La comparaison des coûts avec les autres mobilités (hydrogène, électricité) est plus complexe. Du point de vue de la production, compte tenu du développement des technologies actuelles, les électrocarburants semblent difficilement compétitifs par rapport à l'électromobilité et à la mobilité hydrogène car des briques supplémentaires sont ajoutées (captage du CO₂, méthanation, ...). Du point de vue des infrastruc-

tures nécessaires, il n'y a pas de coût supplémentaire d'infrastructures puisque les carburants synthétiques utilisent les infrastructures actuelles, contrairement aux nouvelles mobilités.

La question de la compétitivité des « électrocarburants » est donc complexe et liée aux évolutions relatives aux coûts (soutien public et fiscalité compris) de l'ensemble des énergies fossiles et alternatives (qui sont majoritairement en développement).

3.1.4. ET LA RÉGLEMENTATION ?

Actuellement, la réglementation nationale n'a pas encore évolué pour autoriser l'utilisation du méthanol comme carburant à cause de sa toxicité. Dans certains pays, comme l'Islande ou le Royaume-Uni, la réglementation autorise à ajouter le méthanol comme adjuvant à hauteur d'environ 5 à 10 %. Des retours d'expérience sur l'impact du méthanol comme nouveau carburant, en termes d'impact technique et d'impact sanitaire, sont nécessaires.

Cependant, la directive européenne RED2¹⁷ (Renewable Energy Directive), qui détermine la part d'incorporation des énergies renouvelables et définit ce qu'on entend par énergies renouvelables, est en cours de transposition au niveau national avec l'ajout aux biocarburants et aux gaz renouvelables d'une nouvelle catégorie : carburants renouvelables d'origine non biologique, catégorie qui ouvre la porte aux électrocarburants. La définition de ces carburants renouvelables d'origine non biologique est actuellement en cours d'élaboration. Pour les électrocarburants, c'est l'origine du CO₂ qui pose question. L'inclusion du CO₂ biogénique et potentiellement du CO₂ atmosphérique y est inscrite mais pas celle à partir de CO₂ d'origine fossile.

Les électrocarburants pour le secteur de l'aérien sont encore au stade du développement donc il n'y a pas encore de certification mise en place pour ce type de carburants alternatifs par l'ASTM¹⁸. La certification ASTM garantit la sûreté et la compatibilité d'usage des carburants alternatifs.

17 La RED2 est la révision de la directive RED- Renewable Energy Directive qui définit les objectifs d'Énergies renouvelables en Europe dont les biocarburants. La révision de la RED a eu pour but d'introduire des critères de durabilités et des méthodologies de calcul de réduction d'émissions de GES (lien : <https://ec.europa.eu/jrc/en/jec/renewable-energy-recast-2030-red-ii>)

18 American Society for Testing and Materials, organisme de certification pour les carburants aériens.

3.2. LES PRODUITS CHIMIQUES : UNE ALTERNATIVE À LA PÉTROCHIMIE ?

 Avantages	 Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● Carbone accessible pour obtenir les produits de base de l'industrie pétrochimique, notamment en partant du méthanol ● Nouveaux produits avec nouvelles propriétés (ex : graphène) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Réémission du CO₂ dépendant de l'utilisation du produit (polymère : CO₂ piégé 10 ans environ) et des filières en fin de vie ● Consommation énergétique élevée en fonction du produit et de la voie de synthèse ● Faible taille du marché « accessible » en terme de ré-usage de CO₂ (marchés de niche sur produits de spécialités à haute valeur ajoutée)

3.2.1. QUELS PRODUITS CHIMIQUES SONT CONCERNÉS ? QUELLE MATURITÉ DES PROCÉDÉS ?

Les produits chimiques utilisés actuellement (plastiques, fibres, solvants ...) sont historiquement synthétisés à partir d'hydrocarbures. Certains sont difficilement substituables. Pour réduire le contenu carbone de ces produits, en plus du développement de la chimie biosourcée et de l'utilisation des matières recyclées, il est possible d'avoir recours au CO₂ capté comme matière première pour la synthèse des produits chimiques (CO₂-produits). Ces « CO₂-produits » permettraient de fournir des produits bas carbone identiques aux produits d'origine fossile.

LES INTERMÉDIAIRES CHIMIQUES : DES MARCHÉS À GROS VOLUME NÉCESSITANT PLUS OU MOINS D'ÉNERGIE À LEUR PRODUCTION

De nombreux intermédiaires chimiques (méthanol, éthylène, propylène) peuvent être produits à partir de CO₂. Ces intermédiaires chimiques (aussi appelés molécules plateformes) sont à l'origine de très nombreux produits chimiques (plastiques, fibres, solvants...). La transformation du CO₂ nécessitant de l'énergie, la consommation énergétique du procédé varie fortement en fonction du produit visé.

Ainsi il est possible de classer les différents produits en fonction de leur contenu énergétique, qui est lié directement à la quantité énergétique nécessaire pour la synthèse du produit correspondant :

- Synthèse des produits en maintenant les oxygènes du CO₂ (base CO₃) : contenu énergétique moins élevé

(ex : bicarbonate) ie la consommation énergétique du procédé est moins élevée

- Synthèse des produits avec les atomes C et H : contenu énergétique plus élevé (ex : méthanol¹⁹, méthane) → **la consommation énergétique du procédé est plus élevée.**

C'est pourtant ce 2^e type de synthèse le plus énergivore qui permet l'accès aux molécules les plus utilisées et donc est le plus en développement, et qui sera détaillé après.

DES DÉVELOPPEMENTS TECHNOLOGIQUES À DIFFÉRENTS STADES DE MATURITÉ POUR LES MOLÉCULES C2-C3

En complément des développements pour la production de méthanol ou méthane (cf la partie 3.1), de nombreux projets se focalisent sur les briques technologiques utilisant ces deux intermédiaires.

La synthèse d'oléfines (éthylène, propylène) à partir de méthanol est commercialisée en Chine (18Mt/an). Pour les molécules plus complexes, comme les aromatiques, la synthèse à partir du méthanol est encore en phase de démonstration. D'autres procédés de conversion du CO₂ sont en cours de développement (TRL plus bas) pour l'obtention d'intermédiaire ou de produits comme le diméthyléther, l'acide formique ou formaldéhyde. Le cas du graphène (structure particulière du carbone en 2D) est un cas intéressant car il s'agit d'une molécule avec des propriétés intéressantes en termes de résistance, conduction électrique ou thermique. Les potentielles applications sont nombreuses telles que les bat-

19 Qui sera utilisé pour la production d'autres intermédiaires comme éthylène, propylène, puis ensuite les polymères et in fine les matériaux, plastiques ...

AVIS D'EXPERT

teries, panneaux solaires, écrans tactiles Les procédés existants pour le produire présentent de nombreux inconvénients (soit trop coûteux, soit la qualité du produit obtenu est non satisfaisante) ce qui limite sa production à une échelle industrielle. Il y a donc besoin de développer de nouvelles voies de synthèse du graphène ; à ce titre une voie utilisant le CO₂ semble prometteuse.

La chimie du CO₂ ouvre la porte à la synthèse de nouveaux produits et des nouveaux matériaux. Par exemple, pour les polymères, cela peut conduire à développer des matériaux avec de nouvelles propriétés techniques, physiques ou chimiques. La R&D en est encore au tout début (stade laboratoire).

LE DÉVELOPPEMENT DE NOUVELLES VOIES DE SYNTHÈSE UTILISANT LE CO₂ POUR DES MOLÉCULES À CHAÎNE PLUS LONGUE (POLYMÈRES)

Parmi les produits qui permettent la production de plastiques et de fibres, les polymères sont des intermédiaires clés. De nombreux travaux de recherche ont permis d'aboutir à la mise en place d'unités industrielles de production de polymères²⁰ à base de CO₂.

Le principal intérêt de ces procédés est qu'ils demandent moins d'apport d'énergie car en général celle-ci est apportée par le co-réactant (exemple : époxyde). Actuellement, le procédé le plus mature est la production de polycarbonates à partir de CO₂ qui peuvent inclure jusqu'à 50% de CO₂ en poids. Ce procédé semble être un des plus prometteurs et concentre l'attention de nombreuses industries chimiques. Covestro a industrialisé une nouvelle mousse de polyuréthane dont l'empreinte carbone²¹ est réduite de 25-30 % par rapport à l'équivalent fossile.

Le développement de ces nouveaux procédés chimiques est encore au stade laboratoire/pilote avec peu de démonstrateurs. De nombreuses recherches ont déjà été effectuées pour améliorer les rendements et trouver les conditions optimales pour les différentes réactions de transformation chimique. Cependant, peu de procédés ont atteint la maturité industrielle comme le montre la Figure 15. Un important travail est encore nécessaire avant une extrapolation à grande échelle pour de nombreuses synthèses.

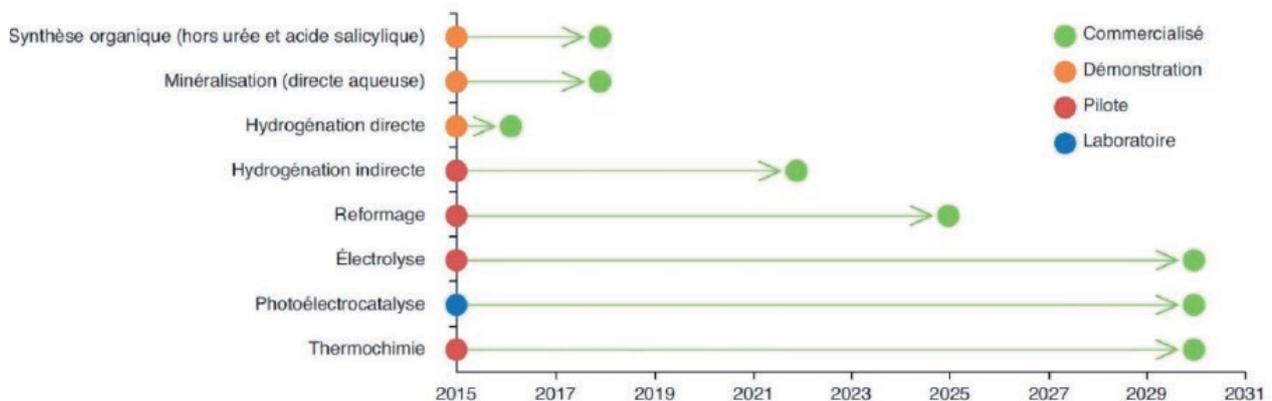


FIGURE 15 : MATURITÉS DES VOIES DE VALORISATION DU CO₂ ET PROJECTIONS COMMERCIALES (CRÉDITS IFPEN)

²⁰ Une partie fossile est toujours présente dans le polymère comme le CO₂ doit être mis en réaction avec un co-réactant qui est généralement d'origine fossile. Pour la synthèse des polycarbonates, les développements en cours utilisent des diols avec du CO₂. Il pourrait être envisagé avec des progrès technologiques que ces diols soient aussi obtenus à partir d'un procédé CO₂.

²¹ Incluant la fin de vie du produit

3.2.2. UN BÉNÉFICE ENVIRONNEMENTAL LIMITÉ CAR LIÉ AU RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE DE SYNTHÈSE ET À LA RÉ-ÉMISSION À TERME DU CO₂

La grande majorité des produits à base de CO₂ conduisent à la réémission du CO₂ à la fin de vie du produit.

LE CAS DU MÉTHANOL

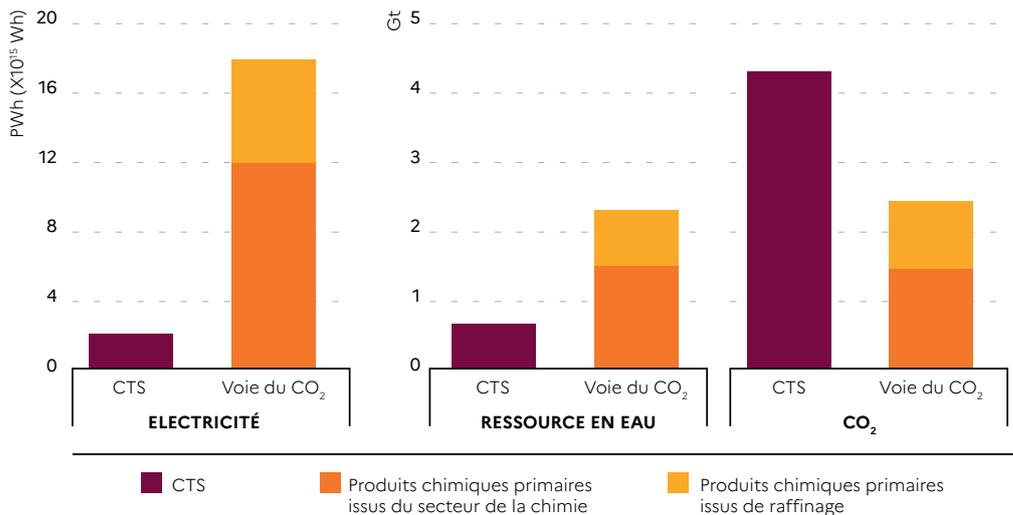
En considérant la synthèse du méthanol à partir de CO₂ capté, sans tenir compte des émissions en fin de vie, il est possible d'obtenir une réduction des émissions de GES de 0,5 à 1 tCO₂ eq/tMeOH (soit - 74 % à - 93 %) par rapport à la voie classique de production du méthanol en prenant des hypothèses favorables (énergie décarbonée, zéro énergie pour le captage et la purification du CO₂²²) (IEA, 2019).

LE CAS DES POLYMÈRES

Les autres produits qui peuvent être synthétisés à partir du CO₂ capté sont les polymères comme les polycarbonates. Le but des synthèses développées est d'augmenter la part de carbone dans la molécule via l'absorption du CO₂ et donc diminuer la part provenant des hydrocarbures. Par exemple, dans le cas du polycarbonate, la réduction en termes de GES est de 15 % par rapport au polycarbonate produit par la voie conventionnelle, potentiellement plus si l'énergie utilisée est décarbonée (IEA, 2019). Dans certains cas, la réduction d'émissions de GES peut même être supérieure au pourcentage d'incorporation du CO₂ dans le polymère du fait du remplacement d'un réactif lui-même d'origine fossile (exemple : les époxydes dont la production demande beaucoup d'énergie).

CAS HYPOTHÉTIQUE DE LA SUBSTITUTION TOTALE DES MATIÈRES D'ORIGINE FOSSILE PAR DU CO₂

L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE ou IEA en anglais) (IEA, 2019) a évalué le potentiel de réduction d'émissions de CO₂ en faisant l'hypothèse du remplacement total des produits chimiques primaires issus du fossile c'est-à-dire NH₃, MeOH, oléfines et les aromatiques par les équivalents issus du CO₂ capté pour l'industrie chimique. En effet, il serait possible de produire ces matières primaires chimiques à partir de CO₂ en considérant le méthanol et l'ammoniac comme premières briques, pour ensuite obtenir une grande variété de produits chimiques. Le méthanol et l'ammoniac seraient produits à partir d'hydrogène électrolytique : il faut donc considérer l'impact en termes de consommation d'électricité et de ressources (eau notamment) de ces nouveaux procédés. Ainsi, l'AIE a calculé la consommation en électricité et en eau (Figure 16) dans le cas où tous les intermédiaires chimiques proviendraient du CO₂ en 2030. La consommation maximum de CO₂ serait de 2,3 GtCO₂ en 2030 (1,4 GtCO₂ en excluant les produits chimiques de base issus de la raffinerie). Cette consommation de CO₂ ne se traduit pas directement en termes de réduction d'émissions de CO₂ car la majorité des produits conduisent à la réémission du CO₂. C'est la substitution du fossile non consommé qui conduit à une réduction des émissions GES à périmètre égal.



Notes CTS : Scénario des technologies propres. Les chiffres du CTS s'appliquent au secteur de la chimie (catégorie électricité), à la production de produits chimiques primaires (catégorie ressource en eau) et aux industries énérgo-intensives (ciment, fer et acier, pâte à papier et aluminium, mais à l'exclusion du secteur de la chimie) (catégorie CO₂). L'énergie nécessaire à la production de produits chimiques primaires issus du raffinage est estimée sur les bases de l'intensité énergétique moyenne de la production chimique finale en 2017.

1,74 PWh d'électricité renouvelable, 2,2 Gt d'alimentation en eau et 2,3 Gt de CO₂ seraient nécessaires pour satisfaire toute la demande de produits chimiques primaires avec des produits chimiques issus du CO₂ en 2030.

Le Scénario de technologies propres a pour objectif de réduire les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et aux procédés de près de 75 % en 2060 par rapport à aujourd'hui. De plus amples informations sont disponibles dans AIE (2018).

FIGURE 16 : SCHÉMA REPRÉSENTANT LES BESOINS EN ÉLECTRICITÉ ET MATIÈRES PREMIÈRES POUR LA PRODUCTION DES INTERMÉDIAIRES CHIMIQUES ADAPTÉ DE (IEA, 2019)

22 Ici il est considéré que l'empreinte environnementale du captage et de la purification du CO₂ est porté par l'émetteur et non l'utilisateur du CO₂

AVIS D'EXPERT

Dans tous les cas, en complément de la pénalité énergétique inhérente aux étapes de synthèse, l'impact sur le climat de ces solutions reste lié à la fin de vie de ces produits et donc aux exutoires possibles à disposition selon les zones géographiques (incinération, mise en décharge, recyclage ...).

3.2.3. SELON LES « CO₂-PRODUITS » CHIMIQUES, DE GRANDES DISPARITÉS D'OPPORTUNITÉS DE MARCHÉ

L'ENJEU DES PRODUITS À HAUTE VALEUR AJOUTÉE... MAIS SOUVENT DES MARCHÉS DE NICHE

D'un point de vue marché, compte tenu de la pénalité énergétique, les produits à haute valeur ajoutée sont les plus intéressants comme cible pour les produits à base CO₂ bien qu'ils représentent un faible volume (marché de niche). En effet, contrairement aux carburants pour lesquels il est nécessaire d'avoir un prix très bas du CO₂ pour conserver un prix d'électrocarburants « acceptable », la valeur des produits à haute valeur ajoutée permet un prix plus élevé du CO₂. Cela permet également d'intégrer un surcôt pour des spécifications sur le CO₂ plus drastiques, c'est-à-dire que les industriels sont prêts à payer un prix élevé du CO₂ pour une plus grande pureté si elle est exigée. Dans ce cas, la mise en place d'une chaîne de valorisation du CO₂ est envisageable pour ce type de produits.

L'EXEMPLE DES POLYMÈRES : LE MARCHÉ LE PLUS PROMETTEUR À UNE SYNTHÈSE À BASE DE CO₂

Les polymères à partir de CO₂ peuvent être compétitifs car le marché visé est un marché à haute valeur ajoutée et que leur utilité n'est pas basée sur un usage énergétique (liaison C-H), mais matière (en général avec un hétéroatome comme une liaison C-O ou C-N) nécessitant moins d'énergie à leur synthèse.

Dans certains cas, les coûts de production du polymère à partir du CO₂ peuvent être plus bas que ceux à partir du fossile car les intermédiaires nécessaires dans les procédés à base de fossiles peuvent être coûteux. Par exemple, le polyuréthane à partir de CO₂ a un coût de production entre 15 à 30 % plus bas par rapport au fossile (Alberici, 2017).

Un autre avantage est le besoin minimum de retrofit pour passer à un procédé utilisant du CO₂, par rapport à d'autres évolutions de procédés de type bio-sourcé. Certains procédés sont déjà commercialisés (cf ci-dessous). Toutefois, les coûts sont très dépendants du polymère et de l'application considérée ainsi que du marché visé.

Exemple de polymère commercialisé : polyuréthane à base CO₂ utilisé notamment dans la production de matras. Le nouveau polymère à base de CO₂ présente des propriétés plus intéressantes (en termes de résistance mécanique notamment) grâce à une structure partiellement différente voir schéma ci-dessous :

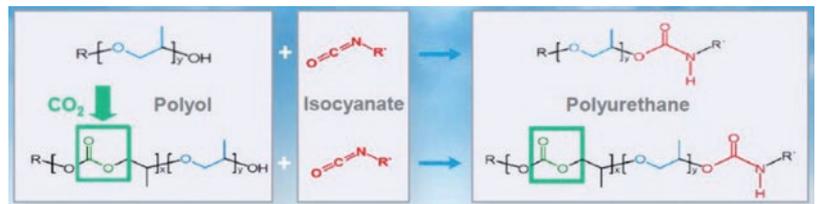


FIGURE 17 : POLYURÉTHANE À BASE DE CO₂
PAR COVESTRO (GÜRTLER, 2018)

UNE COMPÉTITIVITÉ DIFFICILE POUR LES PRODUITS DE COMMODITÉ

Par contre pour des marchés à plus faible valeur ajoutée, les produits à base CO₂ ont plus de mal à concurrencer leur équivalent fossile (méthanol par exemple) car ils ont des marges de profit très faibles (production optimisée) et des coûts de production qui sont beaucoup plus élevés par rapport au prix du marché du produit concerné. Par exemple, pour le carbonate de sodium, le coût de production à partir de CO₂ est 4 fois plus élevé que le prix de vente actuel, du fait d'une consommation électrique élevée pour l'électrolyse de la saumure (ADEME, 2014).

Pour identifier le volume potentiel de CO₂ que ces voies représentent, ci-dessous la taille des marchés potentiels (au niveau mondial) (Alberici, 2017) :

- Bicarbonate : 2,5 Mt/an au niveau mondial soit un potentiel de 0,7 MtCO₂/an au niveau mondial ;
- Carbonate de sodium : 55 Mt/an au niveau mondial soit 12 MtCO₂ au niveau mondial ;
- Polyuréthane (pour les mousses/revêtements...) : 22 Mt/an (2018) soit environ 10 MtCO₂/an au niveau mondial

3.3 LES PRODUITS CARBONATÉS : UN STOCKAGE PÉRENNE POUR DES APPLICATIONS À DÉPLOYER

+ Avantages	- Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ● Pas de ré-émission du CO₂ : stockage pérenne ● Potentiel important de réduction des émissions de CO₂ en couplant le CCU avec le recyclage du béton ● Procédés développés à l'échelle démonstrateur voire commerciale pour le traitement des déchets dangereux ● Avantages environnementaux complémentaires pour le traitement des déchets dangereux 	<ul style="list-style-type: none"> ● Taux d'incorporation du CO₂ très faible (entre 0,02% et 3% de la masse du béton) ● Produits à très faible valeur ajoutée ● Besoin de démontrer les performances techniques des nouveaux matériaux obtenus à partir de CO₂ ● Faible maturité des technologies et pénalité énergétique pour la carbonatation des minéraux ● Compétitivité face aux autres solutions de traitement des déchets à confirmer

3.3.1. LA CARBONATATION, QU'EST-CE QUE C'EST ?

La minéralisation ou carbonatation du CO₂ consiste à faire réagir le CO₂ avec des minéraux qui sont en général des oxydes à base de calcium ou de magnésium pour obtenir des carbonates. Par exemple, le calcaire peut être obtenu par la réaction du CO₂ avec de la chaux (CaO). Il s'agit du procédé inverse de celui mis en œuvre par les cimentiers qui calcinent le calcaire pour obtenir de la chaux.

La réaction est la suivante :



Il est possible de réaliser la réaction de carbonatation sans ajout d'énergie externe, mais avec un rendement de conversion faible et une cinétique très lente, car la réaction est multiphasique : solide (minéral)-gaz (CO₂) ou solide(minéral)-liquide (eau) –gaz (CO₂).

Pour réduire les temps de réaction (condition indispensable pour une mise en œuvre industrielle), les procédés développés nécessitent des conditions opératoires drastiques avec des températures et pressions élevées, ce qui nécessite un apport important d'énergie.

Les développements actuels focalisent sur la carbonatation directe aqueuse solide (minéral)-liquide (eau) – gaz (CO₂). L'étape de dissolution du minéral est l'étape cinétiquement limitante (Sanna, 2014). Les autres para-

mètres influençant la cinétique de la réaction sont la concentration du CO₂ et le ratio liquide/solide (impact sur le mélange (rotation) dans l'autoclave). La R&D se focalise sur ces paramètres pour mettre au point un procédé qui serait opérationnel à l'échelle industrielle.

DÉVELOPPEMENT DE NOUVEAUX MATÉRIAUX « BAS-CARBONE » POUR LE BÂTIMENT

En complément de ces développements en laboratoire, des travaux sur l'intégration du CO₂ dans la production du ciment sont aussi en cours. Le principe est de faire réagir le CO₂ avec des minéraux à base de magnésium ou d'autres matériaux pour obtenir des ciments avec une empreinte carbone plus faible. Ces procédés sont encore au stade de développement R&D comparé au durcissement du béton avec le CO₂.

Le durcissement du béton via le CO₂ consiste à injecter du CO₂ au mélange du ciment, eau et agrégats lors de la formation du béton. Le CO₂ remplace l'eau et réagit avec les oxydes pour donner des carbonates. À l'état naturel, cette réaction se produit mais très lentement vu le taux de pénétration du CO₂ dans les bétons. Pour le béton préfabriqué, le procédé peut être complété par des chambres spécifiques de CO₂ pour augmenter la concentration du CO₂. Il s'agit du procédé le plus mature actuellement (procédé commercialisé par Solidia et LafargeHolcim). Les avantages de ces nouveaux procédés sont l'accès à des bétons avec des performances meilleures ou avec une empreinte carbone plus faible pour les matériaux pour le bâtiment, durée plus courte de durcissement, moins de consommation

d'eau et plus grande robustesse du béton comparé aux produits conventionnels. Le CO₂-béton peut être appliqué au marché des produits en béton préfabriqué mais pas pour le béton armé (risque de corrosion de l'acier à cause de l'acidité du CO₂). La préparation du produit doit être faite sur le site de production²³ puis transportée sur le lieu final de construction contrairement au béton classique. C'est la principale problématique du CO₂-béton : il existe de nombreux sites de préfabrication béton répartis sur le territoire (proche des lieux de construction) et en général loin des sources de CO₂ et contrairement aux usines de ciment, ils n'ont pas d'importantes émissions de CO₂. Ainsi, il faudrait prévoir le transport (parfois sur de longues distances) du CO₂ ce qui peut impacter la viabilité économique des produits finaux.

Un des intérêts de la carbonatation est ainsi l'utilisation de CO₂ avec une qualité moindre (non alimentaire) ou même l'utilisation directe du CO₂ issu des fumées industrielles. Le principal inconvénient de cette voie de valorisation du CO₂ est le taux d'incorporation très faible du CO₂ (entre 0,02% et 3% de la masse du béton) en comparaison avec les carburants et les produits chimiques.

Il existe des projets de développements associant des déchets du BTP comme minéral à carbonater. En France, le projet FastCarb²⁴ a pour but de développer à l'échelle commerciale des procédés de carbonatation accélérée de granulats de béton recyclé. Le but est d'améliorer la qualité des granulats pour une plus grande réutilisation dans le marché du bâtiment. Le projet est à la phase de démonstration des procédés étudiés, directement dans les cimenteries des partenaires du projet en utilisant directement les fumées des sites.

LE RÔLE DE LA CARBONATATION DANS LE TRAITEMENT DE DÉCHETS DANGEREUX

Il est également possible de carbonater des déchets (avec les propriétés adéquates) au lieu d'utiliser des minéraux qui ont comme principal inconvénient de devoir être transportés parfois sur de grandes distances (ex : l'olivine qui est une roche carbonatable est localisée sur quelques régions du monde seulement). Les principaux déchets carbonatables par le CO₂ sont ceux provenant des centrales à charbon ou d'industries : cendres volantes de charbon, laitiers d'aciérie,

poussières de four à ciment, résidus de bauxite et résidus miniers de silicate. Ils ont la caractéristique d'être très basiques et un traitement pour les neutraliser est nécessaire. Ainsi la carbonatation permet de neutraliser des déchets dangereux qui pourraient être ensuite réutilisés dans les travaux publics (remblais de route...)

Comme pour la carbonatation des minéraux, le principal inconvénient est le temps de réaction, beaucoup trop long pour pouvoir être facilement industrialisé. Il est donc nécessaire soit de réaliser un prétraitement des déchets pour réduire leur granulométrie soit d'appliquer des conditions d'opération dures (T et P élevés) pour avoir un temps de réaction acceptable. Par ailleurs, la réactivité et la capacité d'absorber du CO₂ varient en fonction du type de déchets. Certains déchets (majoritairement alcalins) comme les cendres volantes et les laitiers d'aciérie sont de très bons candidats pour la carbonatation, car plus réactifs avec le CO₂ au vu de la grande concentration de métaux réactifs comme les ions calcium ou magnésium (parfois jusqu'à 40% en masse). Après l'étape de carbonatation, une étape de séparation/purification est généralement nécessaire.

Ces deux étapes, prétraitement et séparation, sont énergivores et coûteuses en termes de CAPEX et OPEX. De plus, il faut d'importantes quantités de déchets minéraux par rapport au CO₂ qui doivent être transportés jusqu'au site de carbonatation.

Au niveau R&D, il subsiste donc un besoin de développer des procédés de carbonatation dans des conditions douces (T, P bas) et des vitesses de réaction acceptables pour une industrialisation. Un autre verrou à lever est la pureté du CO₂. En théorie il est possible de faire réagir les déchets minéraux avec du CO₂ contenant des impuretés mais il a été montré que les vitesses de réaction décroissent avec des puretés moindres de CO₂.

L'avantage de cette voie de valorisation de CO₂ est le développement de nouveaux procédés pour le traitement des déchets. À noter, qu'actuellement l'enjeu annoncé ne porte pas sur la réduction des émissions de CO₂ mais bien sur le traitement de déchets. Beaucoup d'entreprises ont investi dans ces procédés car elles misent sur l'économie du secteur du traitement du déchet pour développer un business model. Il est ainsi prévu un volume de CO₂ consommé par la filière jusqu'à

23 Plus précisément pour cette technologie, le CO₂ ne peut pas être utilisé sous forme gazeux sur un chantier ce qui le limite à la préfabrication où il est durci dans des fours. Pour une utilisation en béton prêt à l'emploi, le CO₂ doit être incorporé sous forme liquide ou solide comme avec l'acide oxalique ou l'acide citrique. Source : Projet FinanceClimat- Plan de Transition Sectoriel du Ciment (publication prévue fin 2021).

24 Pour plus d'informations sur le projet voir le site web du projet FastCarb : <https://fastcarb.fr/>

AVIS D'EXPERT

75 ktCO₂/an (IEA,2019). Différents procédés ont été développés et certains sont même commercialisés.

3.3.2. ET LA RÉGLEMENTATION ?

Il y a une vraie question sur la normalisation des produits obtenus via la carbonatation des minéraux. Un besoin de démonstration de la performance technique sur plusieurs années est nécessaire pour les faire accepter dans le marché du bâtiment. Il y a un besoin de modifier les normes existantes car elles ne portent pas sur les performances techniques mais uniquement sur la composition des matériaux (ciment Portland).

Pour la carbonatation des déchets dangereux, la problématique est encore plus complexe car l'intégration de déchets dangereux dans des produits commerciaux est encadrée par la réglementation (via la directive UE sur la fin de vie des déchets). La réglementation française en a une interprétation restrictive : il est très difficile de sortir un produit issu d'une réaction utilisant des déchets dangereux du statut de déchets pour un usage commercial. Avec les évolutions règlementaires autour des concepts d'économie circulaire, il sera peut-être possible de développer ces filières.

3.3.3. UNE RÉDUCTION EFFECTIVE DES ÉMISSIONS MAIS UNE ÉVALUATION DIFFICILE

LES MATÉRIAUX À PARTIR DE CO₂ : UN ENJEU DE DIMINUTION DE LA QUANTITÉ DE CIMENT INCORPORÉ PLUS QU'UN IMPACT EN VOLUME DE CO₂ CAPTÉ

Le principal avantage est l'immobilisation du CO₂ de manière permanente dans le produit contrairement aux autres voies de valorisation du CO₂ déjà citées. Selon les entreprises du domaine, jusqu'à 80% de réduction est annoncée avec ces nouveaux bétons par rapport au béton classique. Cette réduction provient essentiellement de la **diminution de la part de ciment dans le béton** (principal responsable des émissions du béton) via l'ajout de matériau recarbonaté par le CO₂. Par exemple, d'après la société canadienne Carbon Cure, la réduction de la part de ciment dans leur béton permet d'éviter 254 de tonnes de CO₂ émis par tonne de CO₂ utilisée.

Néanmoins, il reste technologiquement complexe de mesurer le CO₂ effectivement immobilisé dans ces procédés de carbonatation. Par ailleurs, le caractère « permanent » de l'immobilisation de CO₂ devra être approfondi, en fonction des usages et de la fin de vie de ces nouveaux matériaux recarbonatés.

En faisant l'hypothèse de remplacer tout le béton par

du CO₂-béton (procédé de durcissement) en supposant une intégration de 3% de CO₂, la demande mondiale en CO₂ atteindrait 1,2 GtCO₂ par an en 2030 (projection de l'AIE).

LES MATÉRIAUX À PARTIR DE CO₂ ET DE DÉCHETS DANGEREUX : DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX AUTRES QUE LA RÉDUCTION DE CO₂

Les matériaux (ou agrégats) fabriqués à partir de la carbonatation des déchets peuvent être réutilisés pour des usages assez limités (ex : remblais de route) mais ils n'ont pas vocation à être utilisés comme des matériaux de construction. La part du CO₂ dans les agrégats est faible mais le CO₂ est stocké de manière permanente.

Le premier intérêt de la démarche est de neutraliser les résidus fortement alcalins en abaissant leur pH. Le taux d'incorporation du CO₂ varie en fonction du type de déchets dangereux :

- Entre 0,07-0,25 tCO₂ pour 1 t de cendres volantes
- Entre 0,08-0,25 tCO₂ pour 1 t de poussière de four de ciment
- Entre 0,26-0,38 tCO₂ pour 1 t de laitier de haut fourneau
- Entre 0,02-0,04 tCO₂ pour 1 t de boue de bauxite

Il a été montré que les agrégats à base CO₂ ont des émissions plus faibles sur leur cycle de vie en comparaison des agrégats conventionnels.

La carbonatation des déchets dangereux permet de les stabiliser avant l'enfouissement. Il s'agit d'une solution alternative aux techniques actuelles de pré-traitement des déchets dangereux. Un autre avantage de ces nouveaux agrégats est l'immobilisation des métaux dans le composé ce qui limite le risque de relargage de métaux potentiellement dangereux dans l'environnement.

En considérant les déchets disponibles et les technologies développées actuellement, l'AIE estime que 15MtCO₂/an (IEA, 2019) pourraient être utilisées pour la carbonatation de déchets dangereux à l'échelle mondiale.

DES MATÉRIAUX-CO₂ POUR QUELLES UTILISATIONS ? À QUEL COÛT ?

Au vu du conservatisme du secteur du bâtiment, les matériaux à base de CO₂ (CO₂-béton ou CO₂-agrégats) peinent à trouver des débouchés au regard des normes en vigueur. Il existe toutefois un potentiel pour le CO₂-béton avec une diminution du temps de durcissement et la diminution de la part de ciment dans le mélange béton pour réduire les coûts.

AVIS D'EXPERT

Pour assurer la pénétration du marché de ces produits à base CO₂, leurs nouvelles propriétés ainsi que leur contenu bas-carbone doivent être mises en avant.

Les coûts varient beaucoup en fonction du procédé, par exemple pour le CO₂-béton, les entreprises du secteur annoncent des coûts d'abattement du CO₂ très faible (5,5€²⁵/tCO₂).

En se positionnant sur le segment du traitement des déchets, certains acteurs envisagent d'ajouter une valeur économique en rajoutant une étape préalable d'extraction des métaux de ces déchets pour d'une part optimiser la carbonatation et d'autre part recycler ces métaux. L'estimation qui a été faite de ces coûts, entre 46 à 278 €/tCO₂ séquestré, est à relativiser avec les coûts des solutions alternatives de traitement de dé-

chets uniquement pour l'extraction des métaux.

Pour autant, au vu des coûts élevés de traitement de certains déchets dangereux, ce type de procédé pourrait se développer en Europe, ainsi que dans certaines régions spécifiques, par exemple celles productrices d'aluminium qui ont besoin de trouver des solutions au traitement de la bauxite. Ainsi les résidus de bauxite pourraient être neutralisés via la carbonatation. Selon les conditions expérimentales, la capacité d'absorption du CO₂ dans les boues rouges serait comprise entre 16,8 et 41,5 kgCO₂/t_{Boue} (Tran N. , 2016). En Australie, l'usine de raffinage de Kwinana du groupe Alcoa opère un procédé de carbonatation de ses boues rouges depuis 2007 avec lequel elle capture environ 70 ktCO₂/an²⁶.

3.4 LE DIOXYDE DE CARBONE : ET POURQUOI NE PAS L'UTILISER DIRECTEMENT ?

Le CO₂ peut être utilisé directement dans l'industrie pour différents usages. Le CO₂ peut être aussi bien utilisé dans des procédés industriels (solvant, décapage...) que dans les serres, l'industrie agro-alimentaire ou le traitement de l'eau. En France, cela représente un marché de 800 ktCO₂/an environ (Figure 18) dont 70% du marché est consommé par l'industrie agro-alimentaire. Au regard des émissions de CO₂ nationales, le volume consommé est vraiment faible. En comparaison, les émissions de l'axe Seine (Le Havre, Port Jérôme, Rouen) sont de 13 MtCO₂/an. Il est difficile d'imaginer un débouché pour ces 13 MtCO₂ si les industriels décident de les capter pour une utilisation directe.

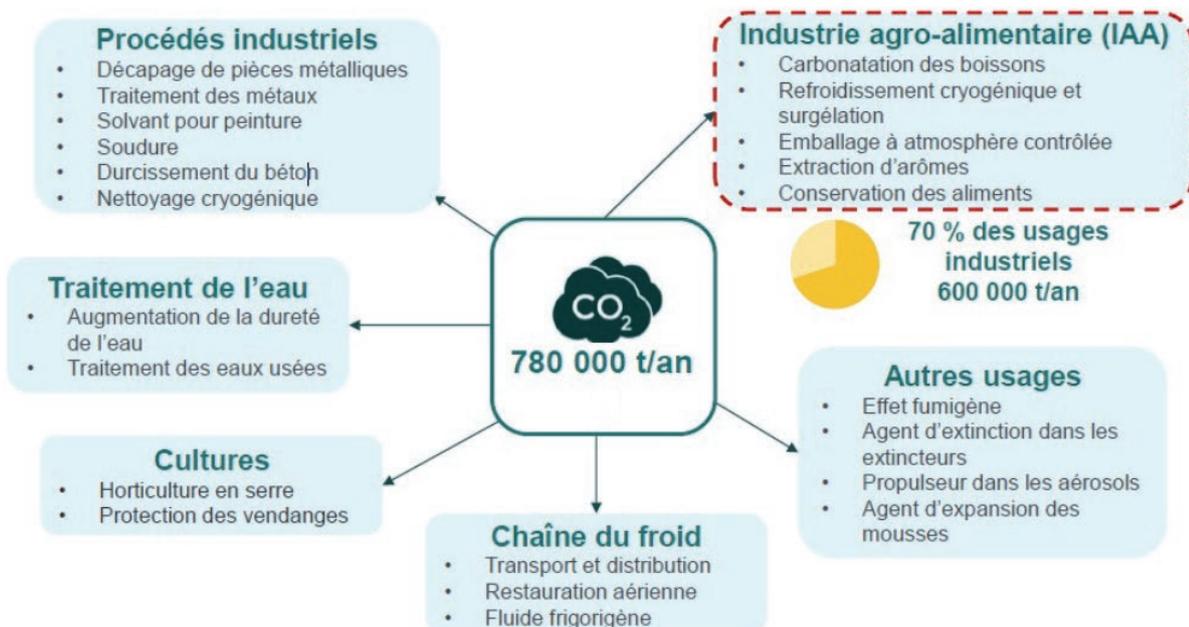


FIGURE 18: PRINCIPAUX SECTEURS UTILISANT DU CO₂ DIRECT (ENEA CONSULTING ET CARBON LIMITS, 2020)

25 Taux de conversion de 0,926 USD/EURO pour l'année 2017

26 Source : FinanceClimat projet- Plan de Transition Sectoriel Aluminium

FOCUS SUR L'UTILISATION DANS LES SERRES

Le CO₂ peut être utilisé pour booster la croissance de procédés biologiques (algues, production sous serres...). Actuellement, un marché du CO₂ existe pour les serres dans beaucoup de régions du monde : il s'agit de la voie la plus mature et la plus commune. À date, les chiffres sur la demande en CO₂ pour la culture sous serre ne sont pas quantifiés. Une faible part des serres dans le monde utilise du CO₂. Les Pays-Bas sont leader dans le secteur avec une consommation annuelle entre 5 et 6,3 MtCO₂. Sur ce chiffre, 500 ktCO₂/an proviennent de sources industrielles (ex : industrie d'ammoniac) pour fournir 6 000 serres (1 900 hectares). Les principales limites sont le coût, la qualité du CO₂ et le manque d'infrastructure de transport de CO₂. Au niveau mondial, un potentiel de 10 MtCO₂/an a été estimé pour les serres (IEA, 2019).

En termes de réduction des émissions de CO₂, il est considéré que 20% du CO₂ injecté serait utilisé par la plante pour sa croissance et donc 80% seraient relargués à l'atmosphère. En fonction de l'utilisation de la plante, le CO₂ est stocké de manière très courte avant d'être ré-émis. Pour espérer une réduction effective d'émissions de CO₂, il faudrait que les émissions de CO₂ déplacées par la non utilisation du gaz naturel compensent les émissions liées au captage, purification et transport.

D'un point vue général, toutes les utilisations directes du CO₂ conduisent à la ré-émission du CO₂ et donc cette utilisation ne permettra pas de réduire de manière significative les émissions de CO₂. Les usages sont à considérer en fonction des avantages apportés par le CO₂ en comparaison aux autres solutions.

RÉFÉRENCES

- ADEME. (2010). *Panorama des voies de valorisation du CO₂* (p. 190). https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/72052_rapport_ademe_version_finale.pdf
- ADEME. (2014). *Valorisation chimique du CO₂—Etat des lieux—Quantification des bénéfices énergétiques et environnementaux et évaluation économique de trois voies chimiques* (p. 15).
- ADEME. (2020). *Le Captage et Stockage géologique du CO₂ (CSC) en France—Le CSC, un potentiel limité pour la réduction des émissions industrielles* (p. 44).
- ADEME, GRDF, & GRTgaz. (2014). *Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire* (p. 238).
- Alberici, S., Noothout, P., Mir, G. U. R., Stork, M., & Wiersma, F. (2017). *Assessing the potential of CO₂ utilisation in the UK* (p. 138) [Final report]. Ecofys.
- ArcelorMittal. (2018). *ArcelorMittal : Possible pathways towards The low emission Plan(t)*.
- Aresta, M., Dibenedetto, A., & Quaranta, E. (2016). State of the art and perspectives in catalytic processes for CO₂ conversion into chemicals and fuels : The distinctive contribution of chemical catalysis and biotechnology. *Journal of Catalysis*, 343, 2–45. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2016.04.003>
- Carbons Limits. (2021). *Axe Seine CCUS – Etude de préféabilité du CCUS dans la région* (p. 97).
- Club CO₂. (2018). *International Overview on CCU Symposium* (p. 33).
- CO₂ Science, & Global CO₂ Initiative. (2016). *Global Roadmap for Implementing CO₂ Utilization* (p. 62).
- Enea Consulting. (2015). *Énergie et carbone pour une chimie verte* (Facts and Figures). <https://www.enea-consulting.com/static/4f4178b81ea221fae5c47e8a03e51e05/enea-energie-et-carbone-pour-une-chimie-verte.pdf>
- Enea Consulting, & Carbons Limits. (2020). *Étude sur l'utilisation du CO₂ sur l'Axe Seine* [Livraison Finale].
- European Commission. (2018). *Novel carbon capture and utilisation technologies* [Scientific Advice Mechanism (SAM)].
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO₂ direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 224, 957–980. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086>
- German Environment Agency. (2016). *Power-to-Liquids : Potentials and Perspectives for the Future Supply of Renewable Aviation Fuel* (p. 36).
- Gürtler, C. (2018). *CO₂ as a building for the polyurethane plastics industry—COVESTRO AG*. Presentation for the National Academies of Sciences Workshop – Developing a research agenda for utilization of gaseous carbon waste streams.
- Ha-Duong, M., & Loisel, R. (2011). Actuarial risk assessment of expected fatalities attributable to carbon capture and storage in 2050. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 5(5), 1346–1358. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2011.07.004>
- Hendriks, C., Noothout, P., & Cook, G. (2013). *Implications of the Reuse of Captured CO₂ for European Climate Action Policies*.
- IEA. (2019). *Putting CO₂ to Use : Creating Value from Emissions* (p. 86). https://iea.blob.core.windows.net/assets/50652405-26db-4c41-82dc-c23657893059/Putting_CO2_to_Use.pdf
- Joint Research Center. (2019). *Direct air capture (DAC) (Facts Behind the Debate)*. European Union.
- Müller, L. J., Kätelhön, A., Bachmann, M., Zimmermann, A., Sternberg, A., & Bardow, A. (2020). A Guideline for Life Cycle Assessment of Carbon Capture and Utilization. *Frontiers in Energy Research*, 8, 15. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00015>
- Olajire, A. A. (2013). Valorization of greenhouse carbon dioxide emissions into value-added products by catalytic processes. *Journal of CO₂ Utilization*, 3, 74–92.
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R., & M. Maroto-Valer, M. (2014). A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chemical Society Reviews*, 43(23), 8049–8080. <https://doi.org/10.1039/C4CS00035H>
- SAPEA. (2018). *Novel carbon capture and utilisation technologies : Research and climate aspects, Research and climate aspects* (SAPEA Evidence Review Report No. 2). SAPEA. <https://doi.org/10.26356/carboncapture>
- Schmitt, L., & Torrenti, J.-M. (2020). *Le Projet National FastCarb*. PBI - *Préfa Béton International*, 7.
- Simon, A. J., Kaahaaina, N. B., Julio Friedmann, S., & Aines, R. D. (2011). Systems analysis and cost estimates for large scale capture of carbon dioxide from air. *Energy Procedia*, 4, 2893–2900. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.196>
- Tran, C. P. (2016). *Red mud minimisation and management for the alumina industry by the carbonation method*. <https://digital.library.adelaide.edu.au/dspace/handle/2440/101570>
- U.S. Department of Energy. (2017). *Accelerating Breakthrough Innovation in Carbon Capture Utilization and Storage. Mission Innovation - Accelerating the Clean Energy Revolution*, 291.
- von der Assen, N., Müller, L. J., Steingrube, A., Voll, P., & Bardow, A. (2016). Selecting CO₂ Sources for CO₂ Utilization by Environmental-Merit-Order Curves. *Environmental Science & Technology*, 50(3), 1093–1101. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03474>
- Zero Emission Platform. (2015). *CCU - Carbon Capture and Utilisation* (p. 23).

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique-, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources. Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse. Dans tous les domaines - énergie, air, économie circulaire, alimentation, déchets, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions. À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques. **L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.**

