

CARBONE LAB

Contexte environnemental actuel et état des technologies potentielles pour la conversion du CO₂

TABLE DES MATIÈRES

0- Glossaire et lexique	2
1- Éléments de contexte	3
2- Principaux procédés pour une réduction globale du CO₂ atmosphérique	4
2.1- Généralités concernant les voies d'utilisation du CO ₂	6
2.2- La conversion du CO ₂ par voie chimique	8
2.2.1- Production de carburants synthétiques (ou électro-carburants)	9
2.2.2- Synthèses de produits chimiques et alternative à la pétrochimie	10
2.2.3- Production de produits carbonatés	11
2.3- La conversion du CO ₂ par voie biologique	12
2.4- Synthèse des principaux freins à lever pour la conversion du CO ₂	12
3- Conclusion	13

0- GLOSSAIRE ET LEXIQUE

ACV	Analyse du cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
BECCS	En anglais <i>Bioenergy with carbon dioxide capture and storage</i>
Ca	Calcium
C ₂ H ₄	Éthylène
C ₃ H ₆	Propylène
CH ₃ OH	Méthanol
CH ₄	Méthane
CCS	Captage du carbone et stockage géologique (en anglais <i>Carbon capture and storage</i>)
CCU	Captage du carbone et utilisation (en anglais <i>Carbon capture and utilization</i>)
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO ₂ atmosphérique	CO ₂ présent dans l'atmosphère
CO ₂ biogénique	CO ₂ issu des procédés de combustion de la biomasse
CO ₂ fossile	CO ₂ issu de la combustion de la matière première d'origine fossile
DAC	Capture directe de l'air (en anglais <i>Direct air capture</i>)
DME	Diméthyléther
Électrolyse	Réaction durant laquelle les composés chimiques sont décomposés en substances simples ou composites sous l'influence d'un courant électrique
EOR	Récupération assistée d'hydrocarbure (en anglais <i>Enhanced oil recovery</i>)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
Graphène	Structure particulière du carbone en 2 dimensions - Formule chimique : (C) _n
H ₂	Hydrogène
Hydrogénation	Réaction chimique qui consiste à ajouter une molécule de H ₂ à un autre composé chimique
Mg	Magnésium
N ₂ O	Protoxyde d'azote
NOx	Oxydes d'azote (notation générique comprenant NO, NO ₂ et N ₂ O)
P2F	<i>Power to Fuel</i> : conversion de l'énergie électrique en carburant liquide (P2L) ou gazeux (P2G)
Procédé Fischer Tropsch	Procédé de synthèse des hydrocarbures à partir de CO et H ₂
R&D	Recherche et développement
Reformage sec	Procédé catalytique qui permet, à partir de composés hydrocarbonés mélangés à de l'air, de produire un gaz riche en hydrogène
Syngas	Gaz de synthèse (CO + H ₂) provenant de procédés thermochimiques
TRL	Niveau de maturité technologique (en anglais <i>Technology readiness level</i>)

1- ÉLÉMENTS DE CONTEXTE

Notre époque est confrontée à des défis environnementaux majeurs qui menacent notre planète et son équilibre écologique. Parmi ces défis, le changement climatique est l'un des plus préoccupants, car il a un impact direct sur la vie des êtres humains, des animaux et des plantes. Les émissions de gaz à effet de serre - en particulier le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) d'origine anthropique - sont l'une des principales causes du réchauffement climatique, et leur réduction est devenue une priorité absolue pour la communauté internationale. Parmi ces gaz à effet de serre, le CO₂ représente près des 2/3 des émissions mondiales de gaz à effet de serre induites par les activités humaines.

Le rapport Meadows, publié en 1972 par le Club de Rome et réédité en 2012,¹ a été l'un des premiers à alerter sur les conséquences néfastes d'une croissance économique illimitée sur l'environnement. Il a notamment mis en évidence les limites physiques de la planète et la nécessité de développer un modèle économique plus durable.

Depuis lors, les Nations unies ont créé, en 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dont la mission est d'évaluer les preuves scientifiques du changement climatique ainsi que ses impacts potentiels. Les rapports du GIEC ont mis en lumière les preuves accablantes du réchauffement climatique causé par les activités humaines, ainsi que les risques considérables associés à la poursuite de ces activités, notamment sur les écosystèmes, la biodiversité et les communautés humaines. Le dernier en date² estime que l'activité humaine est responsable d'une augmentation de la température moyenne à la surface de la planète de + 1,1 °C sur la période 2011-2020, par rapport à la période préindustrielle (période de référence située dans les années 1850-1900). Ce phénomène est corrélé à l'observation d'une augmentation continue des émissions mondiales de gaz à effet de serre d'origine anthropique depuis les années 1750.

“En 2019, les concentrations de CO₂ atmosphérique (410 parties par million) étaient les plus élevées qu'à tout moment depuis au moins 2 millions d'années, et les concentrations de méthane (CH₄ - 1 866 parties par milliard) et de protoxyde d'azote (N₂O - 332 parties par milliard) étaient les plus élevées qu'à tout moment depuis au moins 800 000 ans”.

GIEC | Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6) | mars 2023

Les rapports du GIEC ont également souligné la nécessité d'agir rapidement pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Pour atteindre cet objectif, il est essentiel de réduire les émissions de gaz à effet de serre de manière significative et d'atteindre le “Net Zéro Carbone” d'ici 2050 ; autrement dit, de compenser toutes les émissions de gaz à effet de serre issues des activités humaines³ par l'élimination⁴ d'un volume équivalent de gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère.

¹ Meadows, D., & Randers, J. (2012). *Limits to growth the 30-year update*. Earthscan.

² GIEC. (2023, March). *Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6)*. IPCC. Retrieved April 12, 2023, from <https://www.ipcc.ch>.

³ Selon le dernier rapport du GIEC², en 2019, environ 79 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre proviennent des secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports et des bâtiments réunis et 21 % de l'agriculture, de la foresterie et d'autres utilisations des sols.

⁴ Lorsque l'on parle d'“élimination”, il s'agit de mettre en œuvre des activités humaines afin d'éliminer les gaz à effet de serre de l'atmosphère. Dans le cas du CO₂ par exemple, il s'agit de le retirer de l'atmosphère et de le stocker, de manière durable, dans des réservoirs géologiques, terrestres ou océaniques, ou dans des produits. Sont comprises dans ces activités la valorisation anthropique, qu'elle soit actuelle ou potentielle, des puits biologiques ou géochimiques et le captage direct dans l'air et le stockage, mais en sont exclues le piégeage naturel de CO₂ qui n'est pas causé directement par des activités humaines.

GIEC. (2019, September). *Réchauffement planétaire de 1,5 °C - Résumé à l'intention des décideurs, résumé technique et foire aux questions*. IPCC. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.ipcc.ch/>

Pour y parvenir, il est nécessaire de travailler à tous niveaux d'échelles (mondiale, étatique, régionale, locale, individuelle...) et dans tous les domaines (énergie, industries, bâtiments, transport, agriculture, numérique, commerces, banques, services publics, etc.). Plusieurs démarches doivent, idéalement, être mises en œuvre de manière synchrone afin de maximiser les effets de synergie pouvant exister entre elles et de freiner ces phénomènes de dérèglement et réchauffement climatiques :

- Prise de conscience mondiale de l'impératif de mise en mouvement pour déployer des actions collectives et individuelles vers un ou plusieurs objectifs communs en faveur de l'environnement et de l'équilibre écologique de la planète ;
- Changement de paradigme en faveur d'une économie de l'épanouissement⁵ vs. une économie de la croissance illimitée et mise en œuvre du concept de "redirection écologique"⁶ incluant une analyse fine de nos modes de vie et de nos usages afin de n'en conserver que les aspects essentiels ;
- Innovations en faveur de procédés technologiques plus "propres" et potentiellement inscrits dans des modèles vertueux (e.g. circularité) : amélioration de la performance énergétique et environnementale des procédés existants, développement de nouveaux modes de production, développement de technologies spécifiques pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre, etc.

Cette note se focalise sur le dernier point concernant les innovations, à différents stades de maturité (TRL - *Technology readiness level*) et présente un état des lieux global des principales solutions technologiques en cours de recherche et développement qui poursuivent l'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre, en particulier le dioxyde de carbone (CO₂).

2- PRINCIPAUX PROCÉDÉS POUR UNE RÉDUCTION GLOBALE DU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE

Il existe une multitude de pistes pour réduire et/ou éliminer le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère et issu des activités humaines. Il est important de noter que chaque élément décrit ci-dessous présente un certain nombre d'avantages, mais également un certain nombre de limites. En outre, le GIEC et l'ensemble des experts travaillant sur les problématiques liées au climat insistent sur le fait qu'il n'existe pas une solution unique qui permette de réduire de façon significative les émissions de gaz à effet de serre. C'est pourquoi une combinaison de ces différentes pistes, accompagnée d'un changement profond des paradigmes de nos sociétés contemporaines, est inévitable pour espérer atteindre les objectifs climatiques sur lesquels se sont engagés les États signataires de l'Accord de Paris.

- Le développement et le déploiement des énergies renouvelables - L'utilisation d'énergies renouvelables - telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et marine - en remplacement des sources d'énergie fossile permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- L'amélioration de l'efficacité énergétique - Les technologies d'efficacité énergétique, telles que l'isolation des bâtiments, les équipements économes en énergie et les systèmes de gestion de l'énergie, permettent de réduire la consommation d'énergie et donc les émissions de gaz à effet de serre, dont le CO₂.

⁵ Raworth, K. (2018, May 14). *Une économie saine devrait être conçue pour l'épanouissement, pas pour la croissance*. TED. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.ted.com>.

⁶ Bonnet, E., Landivar, D., & Monnin, A. (2021). *Héritage et fermeture : une écologie du démantèlement*. Éditions divergences.

- La généralisation de modes de gestion durable des terres - La gestion durable des terres peut contribuer à augmenter le stockage de carbone dans les sols et les forêts, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre.
- Le développement et le déploiement des technologies de capture et de stockage du carbone (CCS) - Ces technologies permettent de capturer le CO₂ émis par les sources industrielles et de le stocker sous terre ou sous la mer, réduisant ainsi la quantité de dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère.
- L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie⁷ - L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale. Ce type de matière peut être utilisé pour la fabrication d'électricité et/ou de chaleur (en remplacement des sources d'énergie fossile) de deux façons : par combustion directe ou par méthanisation (*i. e.* production de biogaz) suivi d'une combustion. Ces procédés peuvent être couplés à différentes technologies de capture du carbone qui permettent de piéger le CO₂ émis lors de la combustion. On parle alors de BECCS² (*Bioenergy with carbon dioxide capture and storage*).
- Le développement et le déploiement des technologies de capture directe de l'air (DAC) - Cette technologie consiste à capturer directement le CO₂ de l'air puis à le stocker sous forme solide ou liquide. Elle est, entre autres, particulièrement considérée dans les stratégies de croissance de certains géants pétroliers (américains et chinois, notamment) qui y voient l'opportunité de capturer des quantités massives de CO₂ qu'ils peuvent ensuite injecter dans le sol pour accroître les rendements d'extraction des sources d'énergie fossile (la séquestration géologique du produit injecté semblant presque secondaire dans leur stratégie).^{8, 9} On parle alors de récupération assistée de pétrole par injection de dioxyde de carbone (soit CO₂-EOR en anglais pour *CO₂ enhanced oil recovery*).
- **Le développement et le déploiement des technologies de capture, d'utilisation (CCU) et, éventuellement, de stockage (CCUS) du carbone. Les recherches sur l'utilisation du dioxyde de carbone se concentrent sur le développement de technologies qui permettent de le convertir en produits utiles tels que des carburants synthétiques, des produits chimiques, des matériaux de construction, des produits pharmaceutiques, etc.**^{10, 11}. Par ailleurs, des recherches sont en cours¹² pour utiliser l'IA afin d'optimiser les processus de capture, d'utilisation et de stockage de carbone. En effet, l'IA peut aider à améliorer l'efficacité, la sécurité et la rentabilité des technologies de gestion du carbone.

La suite de ce document se concentre sur la description des différentes technologies d'utilisation du dioxyde de carbone (CCU) et plus particulièrement celles qui permettent de le convertir et de le valoriser sous la forme de produits à valeur ajoutée.

⁷ EDF. (2021, June). *Qu'est-ce que la biomasse ?* EDF. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.edf.fr>.

⁸ Mann, N. (2019, June 15). *Le pétrolier Oxy captera le carbone de l'air du Texas*. L'Usine Nouvelle. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.usinenouvelle.com>.

⁹ Carpentier, A., Bellanger, E., & Bretonnier, M. (2023, March 19). *Retirer le CO2 de l'atmosphère sauvera-t-il le climat ?* Le Monde. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.lemonde.fr>.

¹⁰ Chauvy, R., & De Weireld, G. (2020, December). CO₂ Utilization Technologies in Europe: A Short Review. *Energy Technology - Generation, conversion, storage, distribution*, 8(12): 2000627. <https://onlinelibrary.wiley.com>.

¹¹ Sun, S., Sun, H., Williams, P. T., & Wu, C. (2021, July 20). Recent advances in integrated CO₂ capture and utilization: a review. *Sustainable Energy Fuels*, 5, 4546-4559. <https://pubs.rsc.org>.

¹² Frontiers in Energy Research. (2022, August 22). *AI Technology of Carbon Capture and Storage to Achieve Global Net-zero Carbon Emission*. Frontiers. Retrieved April 14, 2023, from <https://www.frontiersin.org>.

2.1- Généralités concernant les voies d'utilisation du CO₂

Dans la communauté scientifique, l'utilisation du CO₂ est considérée comme un processus dans lequel un ou plusieurs produits de valeur économique sont fabriqués à l'aide de dioxyde de carbone, qu'il soit fourni à partir de gaz résiduaux d'origine fossile, capté dans l'atmosphère par un processus industriel ou, capturé biologiquement par des processus terrestres. Aujourd'hui, la question de la conversion du dioxyde de carbone semble représenter l'un des enjeux clés (nécessaire mais non suffisant) pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et réduire l'impact des activités humaines sur l'environnement, ainsi que pour développer des processus de production "moins chers et plus propres" comparativement à ceux utilisant des hydrocarbures conventionnels (sources d'énergie fossile). En parcourant la littérature scientifique,^{10, 11, 13, 14, 15} on observe que les procédés de conversion du dioxyde de carbone sont indissociables de procédés de capture et de purification du CO₂, mais aussi parfois de son transport vers les installations qui permettent sa transformation. C'est pour cette raison que l'on parle de CCU, et plus précisément d'écosystème CCU.

De nombreuses technologies ont été développées ou sont en cours de développement (Figure 1) pour transformer le dioxyde de carbone en produits utiles et durables, tels que des biocarburants ou des produits chimiques utilisés en tant que matières premières dans différents secteurs et/ou industries (pharmaceutique, plasturgie, bâtiment, automobile, etc.). Compte tenu de la maturité de certaines de ces technologies, il est évident que le sujet de la valorisation du dioxyde de carbone intéresse le monde de la recherche depuis au moins une dizaine d'années.

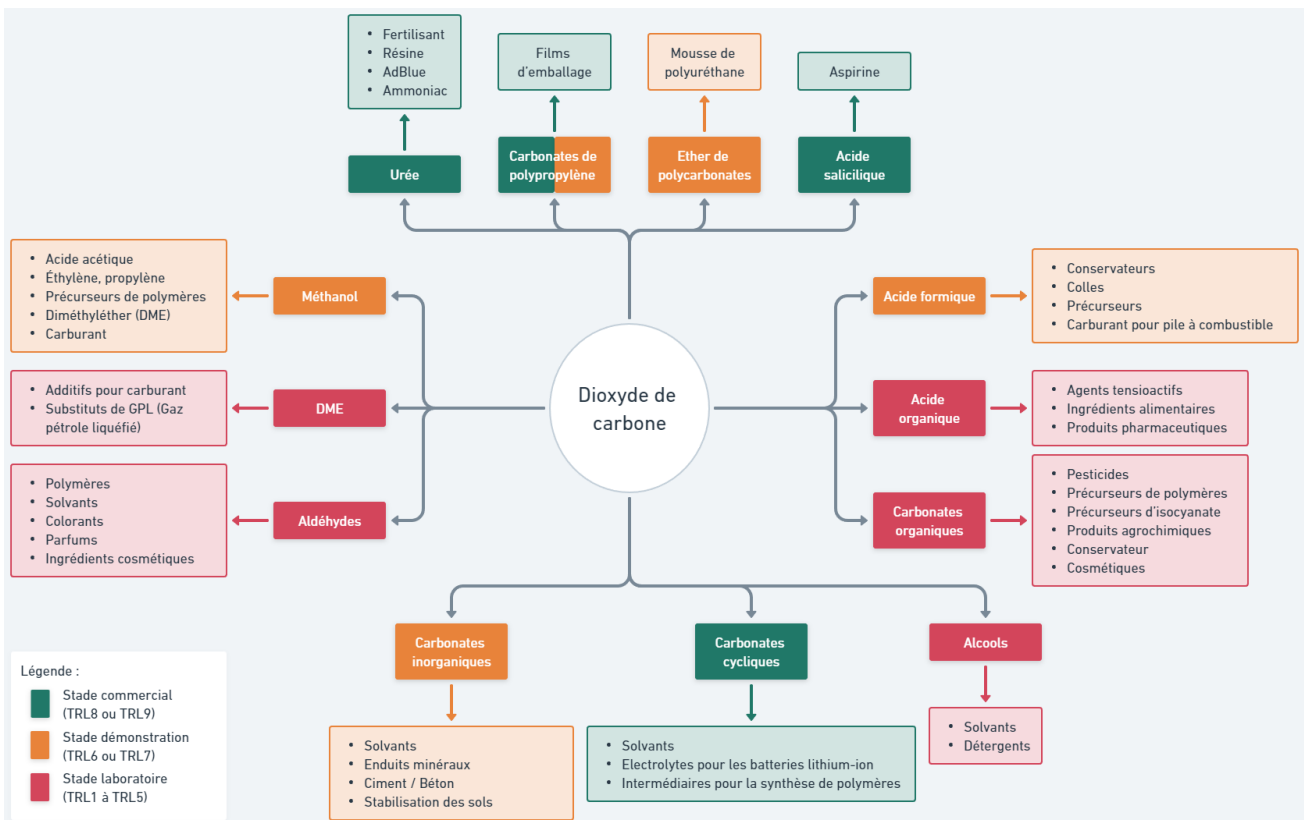


Figure 1 : Produits intermédiaires et produits finaux issus de la valorisation du CO₂ (tiré de l'avis d'expert de l'ADEME¹⁴).

¹³ Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E. A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J. C., Smith, P., & Williams, C. K. (2019, November 7). The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature*, 545, 87-97. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6>.

¹⁴ El Khamlichi, A. (2021, September). *Valorisation du CO₂ : Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ?* La librairie ADEME. Retrieved April 21, 2023, from <https://librairie.ademe.fr>.

¹⁵ Annales des Mines. (2022, January). Capture, stockage et utilisation du carbone. *Responsabilité & Environnement*, 105. <https://www.cairn.info>.

Cependant, l'efficacité à grande échelle de la plupart de ces technologies de valorisation reste encore à prouver. Une de leurs problématiques majeures réside dans le fait que le CO₂ est une molécule inerte, thermodynamiquement très stable, et qu'il faut donc une quantité d'énergie considérable pour la transformer en d'autres molécules plus complexes. De plus, en fonction de la nature du produit final synthétisé et de son usage, le CO₂ sera réémis dans la majorité des cas, et ce, plus ou moins rapidement (Figure 2). Rien qu'en considérant ces deux éléments, on peut affirmer que la contribution globale des technologies de valorisation du dioxyde de carbone en termes de réduction des émissions de CO₂ est difficile à quantifier.¹⁴

Dans leur article "*The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal*," publié dans la revue *Nature* fin 2019, Hepburn et al.¹³ s'attachent à analyser les conditions de déploiement et d'implémentation de dix voies d'utilisation du dioxyde de carbone (regroupant notamment des technologies de CCS et de CCU). Pour cela, ils caractérisent chacune de ces voies comme étant soit "cyclique", "fermée" ou "ouverte" et insistent sur le fait de développer une approche systémique et interdisciplinaire de la question des effets des technologies d'utilisation du CO₂ sur le climat (Figure 2). En effet, selon les auteurs, divers effets directs et indirects sur le cycle de vie concerné doivent être pris en compte et comparés à une référence plausible ou contrefactuelle (ce qui se serait passé sans l'utilisation du CO₂). En outre, "*calculer assidûment les impacts directs à un endroit et à un moment donné est de peu d'utilité s'il existe un effet rebond dans lequel les émissions se produisent ailleurs ou plus tard*". En France, les recommandations de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) sont similaires.¹⁴ En effet, parmi les préconisations de l'agence sur le sujet, on peut citer celle consistant à "*renforcer le cadre normatif sur l'évaluation de l'impact climatique du CCU dans une logique d'analyse du cycle de vie (ACV) notamment pour clarifier l'allocation des ressources d'émissions entre l'émetteur de CO₂ et l'utilisateur de ce CO₂ capté et valorisé*". Elle insiste également sur le fait que chaque projet de CCU doit faire l'objet d'une ACV et d'une évaluation spécifique afin de déterminer les impacts réels que peut avoir le projet concerné sur le climat. Aucun référentiel "générique" n'est actuellement en mesure de s'appliquer à tous les projets de CCU envisagés.

Il est donc essentiel de continuer à investir dans la recherche et à investiguer ces sujets par une approche d'analyse systémique afin d'envisager des technologies bénéfiques pour le climat permettant d'atteindre, notamment, l'objectif de "Net Zéro Carbone".

Dans la suite du document sont décrites les différentes technologies permettant la conversion du CO₂. Comme énoncé précédemment, ces technologies font intervenir des dispositifs de capture (identiques à ceux utilisés dans les processus de CCS). En outre, les différents modes d'usages directs du CO₂ ne sont pas abordés car n'impliquant pas sa conversion en un composé chimique différent.

Figure 2 : Schéma récapitulatif du cycle d'utilisation et d'élimination du dioxyde de carbone (traduction et adaptation à partir de l'article de Hepburn et al.¹³).

2.2- La conversion du CO₂ par voie chimique

Les voies chimiques de valorisation du CO₂ sont multiples^{10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18} : synthèse organique, reformage sec, hydrogénation, électrochimie, thermochimie, photochimie, photo-électrocatalyse, minéralisation, etc. Elles ont chacune leurs spécificités et conduisent à différents produits qui peuvent être catégorisés en trois grandes familles : (i) les carburants synthétiques (ou électro-carburants), (ii) les produits chimiques - parfois intermédiaires - utilisés dans la fabrication des plastiques, fibres, solvants, engrais, cosmétiques, (etc.) et (iii) les produits carbonatés (e. g. carbonates inorganiques, carbonates organiques, bétons de spécialité...).

Quelle que soit la voie de valorisation considérée, le développement des filières correspondantes implique de lever des verrous plus ou moins importants, qu'il s'agisse de verrous technologiques, économiques, environnementaux ou, généralement, d'une combinaison des trois. Ces derniers, combinés au caractère "nouveau" de certaines filières expliquent les différents niveaux de maturité actuellement observés.

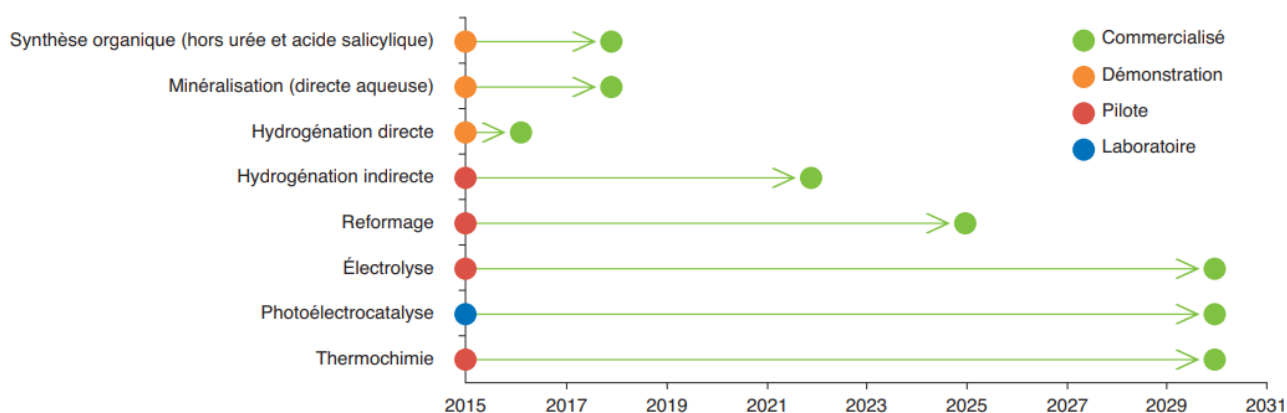


Figure 3 : Maturité des voies de valorisation du CO₂ et projections de commercialisation (tiré du panorama IFPEN¹⁶).

2.2.1- Production de carburants synthétiques (ou électro-carburants)

On distingue deux voies principales de production de carburants synthétiques : le Power to Liquid (P2L) ou le Power to Gaz (P2G), dont l'appellation générique est Power to Fuel (P2F).

Dans le cas de la première voie, les carburants liquides synthétiques sont obtenus par transformation électrochimique du dioxyde de carbone. Actuellement, de nombreux projets sont en cours, au stade pilote ou démonstrateur (TRL6 ou TRL7, respectivement), mais il n'existe pas encore d'unité à l'échelle industrielle.¹⁴ Parmi les produits cibles, le méthanol est le plus étudié : il peut être utilisé directement comme carburant ou bien servir d'intermédiaire pour la production de carburants liquides (diesel, diméthyléther, ...).¹⁹

Trois méthodes peuvent être considérées pour synthétiser le méthanol (CH₃OH) :

- La réduction directe du CO₂ avec de l'hydrogène, obtenu lui-même par électrolyse de l'eau ;

¹⁶ Pasquier, D. (2013). La conversion électrochimique du CO₂ en acide formique. *L'actualité chimique*, 371-372, 89-94. <https://new.societechimiquedefrance.fr>.

¹⁷ IFPEN. (2016). *La valorisation chimique du CO₂*. Connaissance des énergies. Retrieved April 24, 2023, from <https://www.connaissancedesenergies.org>.

¹⁸ Pollutec. (2023, March 6). *Valorisation du CO₂ : où en est-on ? | Capteurs d'Avenir*. Pollutec Learn & Connect. Retrieved April 24, 2023, from <https://learnandconnect.pollutec.com>.

¹⁹ International Energy Agency. (2019). *Putting CO₂ to Use: Creating Value from Emissions*. IEA. Retrieved April 24, 2023, from <https://iea.org>.

- La réduction du CO₂ pour produire le méthane (CH₄) à partir duquel synthétiser CH₃OH ;
- L'électro-réduction directe du CO₂ en méthanol à partir de l'eau sans passer par l'hydrogène.

Bien qu'encore à l'échelle laboratoire, cette dernière voie ouvre des possibilités prometteuses en termes de réduction d'énergie car elle permet d'éviter l'étape de production de l'hydrogène (particulièrement coûteuse lorsqu'il s'agit de l'obtenir par électrolyse de l'eau, elle représente 45 % à 60 % de l'énergie utilisée pour la production de carburants synthétiques). Par ailleurs, dans le secteur aéronautique, l'utilisation du CO₂ est également envisagée pour trouver un substitut synthétique en remplacement du kérosène d'origine fossile. Le procédé développé combine deux briques technologiques :

- La production de syngas (mélange CO + H₂) à partir de dioxyde de carbone et d'eau (pilote - TRL6) ;
- La production de kérosène à partir du syngas préalablement généré via le procédé Fischer-Tropsch (procédé de catalyse hétérogène industriellement mature).

En ce qui concerne la voie Power to Gas, il s'agit de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau puis de le faire réagir avec le dioxyde de carbone pour produire du méthane. En France, plusieurs projets de démonstration (TRL7) ont été réalisés avec, en fin de chaîne, l'utilisation du CH₄ produit comme carburant gazeux en injection réseau.

Si les électro-carburants présentent des avantages importants - tels que la possibilité de continuer à utiliser les infrastructures existantes pour leur production ou encore d'être utilisés pour d'autres usages que la mobilité (industries, production de chaleur, production d'électricité) - des inconvénients majeurs doivent toutefois être soulignés : (i) ils offrent une durée de stockage du CO₂ allant de quelques heures à quelques jours (réémission pratiquement directe dans l'atmosphère) ; (ii) leur synthèse implique un développement massif des énergies renouvelables du fait de la stabilité de la molécule de CO₂ ainsi que la levée de plusieurs verrous technologiques et économiques (consommation en eau importante et rendement énergétique globale de la chaîne pour la production d'hydrogène par électrolyse).¹⁴

2.2.2- Synthèses de produits chimiques et alternative à la pétrochimie

Le dioxyde de carbone peut constituer une ressource à partir de laquelle synthétiser les composés chimiques de base (CO₂-produits) actuellement produits par l'industrie pétrochimique. En particulier, sa transformation en intermédiaires réactionnels (ou molécules plateformes) - tels que le méthanol (CH₃OH), l'éthylène (C₂H₄), le propylène (C₃H₆) - donne la possibilité d'envisager de nouveaux développements technologiques pour obtenir des produits bas carbone identiques aux produits d'origine fossile (plastiques, fibres, solvants...).

Différents types de réactions peuvent être envisagées à partir du CO₂. Elles demandent plus ou moins d'apport en énergie selon les transformations subies par la molécule. Ainsi, envisager la synthèse de produits pour lesquels le carbone conserve son état d'oxydation (maintien des atomes d'oxygène de la molécule de CO₂) est moins coûteux en énergie comparativement à la synthèse de produits au sein desquels l'état d'oxydation du carbone est plus faible (produits contenant plusieurs atomes de carbone et/ou d'hydrogène, tels que le méthanol et le méthane). Néanmoins, les produits les plus utilisés actuellement sur le marché sont accessibles via ce dernier type de réaction. C'est pourquoi, la majeure partie des recherches et développements en cours se focalisent sur les problématiques liées aux procédés et technologies correspondants. On observe d'ailleurs des stades de maturité différents selon la voie considérée et les produits finaux à synthétiser (Figure 3). Par exemple :

- La synthèse d'oléfines (éthylène C₂H₄, propylène C₃H₆) à partir du méthanol est déjà commercialisée en Chine.¹⁴ En Europe, il semble qu'elle soit encore en phase de démonstration, tout comme la synthèse de molécules plus complexes (telles que les aromatiques) à partir de CH₃OH.¹⁰
- D'autres procédés de conversion du CO₂ sont en cours de développement (TRL2 ou TRL3) pour synthétiser des intermédiaires ou des produits tels que le diméthyléther, l'acide formique ou le formaldéhyde (Figure 1).^{10,14}
- De nouvelles voies de synthèse utilisant le CO₂ sont également en cours d'étude (TRL1 à TRL5) pour la production de composés chimiques possédant de nouvelles propriétés techniques, physiques ou chimiques - tels que le graphène, les polymères à base de CO₂, ... - tout en cherchant à minimiser l'empreinte carbone sur l'ensemble du cycle de vie de ces produits.^{10,14}

Cependant, outre la problématique du coût énergétique précédemment mentionnée, plusieurs inconvénients supplémentaires méritent d'être soulignés : (i) tout comme dans le cas des électro-carburants, l'utilisation de tels produits chimiques abouti à la réémission du CO₂ utilisé, même si cela peut se produire à horizon 10 ans dans le cas des polymères, (ii) il existe de grandes disparités d'opportunités de marché pour le ré-usage du dioxyde de carbone permettant la synthèse de CO₂-produits (marché de niche pour les produits à haute valeur ajoutée, compétitivité difficile pour les produits de commodité).

2.2.3- Production de produits carbonatés

La carbonatation (ou minéralisation) consiste à faire réagir le CO₂ avec des minéraux : ce sont généralement des oxydes à base de calcium (Ca) ou de magnésium (Mg). Cette voie présente l'avantage de permettre un stockage théoriquement pérenne du CO₂.^{10,14,15,18}

La carbonatation intervient dans les processus de stockage du dioxyde de carbone (CCS) qui aboutissent à sa séquestration dans différentes formations géologiques telles que les aquifères. Cette réaction peut se produire dans les conditions ambiantes de température et de pression, mais présente cependant un rendement de conversion très faible et une cinétique très lente. Pour réduire les temps de réaction et exploiter ce type de réaction chimique à l'échelle industrielle, les procédés d'utilisation du CO₂ développés nécessitent des conditions opératoires drastiques de température et de pression, ce qui implique donc un apport d'énergie important.

Actuellement, deux voies de valorisation du dioxyde de carbone sont envisagées dans le secteur des matériaux de construction :

- Le développement de matériaux "bas-carbone" pour le bâtiment - Il s'agit, d'une part, de parvenir à intégrer du CO₂ dans la production du ciment afin de diminuer son empreinte carbone (voie encore au stade de développement R&D). D'autre part, le dioxyde de carbone est également utilisé pour des applications de durcissement du béton (procédé actuellement commercialisé).¹⁴ Ce composé remplace alors une partie de l'eau du mélange ciment · eau · agrégats et réagit avec les oxydes en présence pour former des carbonates et permettre une prise beaucoup plus rapide du béton. En outre, la carbonatation peut aussi être envisagée dans le cadre du recyclage de ce matériau avec comme objectif l'amélioration de la qualité des granulats de béton recyclé pour une plus grande réutilisation dans le marché du bâtiment.

- La carbonatation appliquée au traitement de certains déchets - Cette voie concerne principalement les déchets provenant de 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). Ces matériaux sont caractérisés par un pH très basique et une forte nécessité de neutralisation (diminution du pH aux alentours de 7). La carbonatation permet cette neutralisation et laisse ensuite la possibilité de réutiliser ces déchets dans les travaux publics (remblais de route).

Malgré l'aspect prometteur des possibilités offertes par ces voies de valorisation, le taux d'incorporation du CO₂ dans la matière reste très faible (entre 0,02 % et 3 % de la masse du béton). De plus, des études supplémentaires sont nécessaires afin de démontrer les performances techniques des nouveaux matériaux obtenus à partir de CO₂ mais également d'optimiser les technologies pour qu'elles puissent être développées à l'échelle industrielle. Finalement, viennent s'ajouter des problématiques économiques (produits finaux à très faible valeur ajoutée, question de la compétitivité face aux autres voies de traitement des déchets) et réglementaires.

2.3- La conversion du CO₂ par voie biologique

La conversion du dioxyde de carbone par voie biologique¹⁴ consiste en sa transformation par un microorganisme vivant qui apporte l'énergie nécessaire à sa transformation. Actuellement, les procédés biologiques les plus développés portent sur la production de biométhane (CH₄) par méthanation biologique - *i. e.* conversion de l'hydrogène (H₂) et du CO₂ par des microorganismes - et l'utilisation de microalgues pour la production de composés à haute valeur ajoutée (pigments, oméga 3, ...) ou, d'ici une dizaine d'années, de biocarburants.²⁰

Pour chacune de ces voies, l'avantage réside dans une consommation énergétique très faible car provenant directement de la photosynthèse au sein des microorganismes. En revanche, la consommation du CO₂ par ces entités reste faible et la phase d'extraction des molécules d'intérêt très énergivore. Pour des applications telles que la fabrication de biocarburants, le coût engendré est le frein principal au développement de la filière.²¹

2.4- Synthèse des principaux freins à lever pour la conversion du CO₂

Avant même de considérer la valorisation proprement dite du dioxyde de carbone, il est important de noter que les coûts liés à sa captation ne sont pas négligeables : ils sont d'autant plus importants que la concentration de CO₂ à capter est faible. En outre, la plupart des voies de valorisation décrites précédemment nécessitent des niveaux élevés de concentration et de pureté du flux capté. En ce sens, l'étape préalable de purification a un impact fort sur le coût final du dioxyde de carbone. Des axes de recherche portent actuellement sur l'adaptation de procédés de valorisation afin d'être en mesure de s'affranchir de cette contrainte de pureté (*e. g.* ICCU¹¹ - *Integrated carbon capture and utilization*). Un autre enjeu porte sur la question du transport : le développement de la filière va nécessiter, comme pour l'hydrogène, des pipelines, des terminaux mais peut-être aussi des navires et des camions appropriés pour acheminer les flux captés vers les installations permettant leur valorisation.

²⁰ "L'obtention des produits via la valorisation biologique pourrait prétendre à l'étiquette "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."

El Khamlichi, A. (2021, September). *Valorisation du CO₂ : Quels bénéfices ? Sous quelles conditions ?* La librairie ADEME. Retrieved April 21, 2023, from <https://librairie.ademe.fr>.

²¹ Planète Énergies. (2021). *Les 3 voies de la valorisation du CO₂*. Retrieved April 24, 2023, from <https://www.planete-energies.com>.

Le principal frein de la valorisation du CO₂ réside dans l'intensité énergétique des procédés. En effet, la transformation chimique d'une telle molécule se fait via l'utilisation de catalyseurs ou de molécules réactives et un apport important d'énergie, qui peut être sous forme de molécule (e. g. H₂). L'énergie nécessaire à sa transformation est d'autant plus élevée que l'état d'oxydation du composé à produire est faible. Face à cela, les systèmes de conversion avancée (électrolyse notamment) et la conversion thermochimique alimentée au solaire semblent les plus intéressants.¹⁸

La durée d'immobilisation du CO₂ constitue un autre élément important. Sa valorisation en matériaux de construction offre un temps de séquestration plus élevé (théoriquement pérenne) que la transformation en produits chimiques (maximum 10 ans) ou en carburants (maximum 1 an). D'ailleurs, dans le cadre de ses travaux pour la filière "captage, stockage et valorisation du CO₂", le CNRS focalise ses recherches sur trois axes : (i) activer et transformer le CO₂ par des procédés moins énergivores, (ii) respecter les principes de la chimie verte et (iii) intégrer des analyses économiques et de cycle de vie. Ce dernier axe met l'accent, en plus de la durée du stockage, sur la question du CO₂ supplémentaire émis lors des processus de valorisation.¹⁸

Ces éléments rejoignent les conclusions de l'ADEME en ce qui concerne la valorisation du CO₂. En effet, selon l'Agence, une telle démarche "pourra contribuer aux objectifs de neutralité carbone sous réserve de favoriser l'utilisation du CO₂ biogénique tout en utilisant massivement l'énergie renouvelable, et en privilégiant la fabrication de produits avec un stockage temporel long du CO₂ (au minimum plusieurs dizaines d'années)".¹⁴

3- CONCLUSION

Cette note dresse un état des lieux global concernant la question des grands enjeux environnementaux contemporains et s'intéresse à l'une des possibilités technologiques pouvant contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre : la valorisation du dioxyde de carbone par conversion en d'autres produits à valeur ajoutée. Même si les technologies de capture et d'utilisation du dioxyde de carbone sont prometteuses, elles ne constituent pas une réponse unique et universelle mais s'intègrent dans un ensemble d'actions et de "solutions" à déployer de façon massive pour parvenir à maintenir la température de surface du globe constante d'ici 2050, puis permettre à la planète de se régénérer progressivement.

Pour l'Agence internationale de l'énergie (IEA) et l'ADEME,^{14,19} valoriser le CO₂ n'est pas nécessairement synonyme de réduction des émissions. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte : la source du CO₂ (biogénique, capté dans l'air ou fossile – les deux premiers étant plus intéressants) ; le produit ou service que le produit à base de CO₂ remplace ; mais aussi l'intensité en carbone de l'énergie utilisée pour le processus de conversion et la durée de stockage du CO₂ dans le produit. L'ampleur du marché pour cette utilisation particulière constitue un autre point important à prendre en compte. En outre, des enjeux réglementaires sont aussi à prendre en compte : cadrage normatif commun à l'échelle mondiale pour l'évaluation de l'impact climatique du CCU dans une logique d'analyse du cycle de vie, normes encadrant les performances techniques des matériaux, évolutions réglementaires autour des concepts d'économie circulaire, etc.

Néanmoins, en complément d'autres solutions de décarbonation, le rapport du GIEC pointe l'impérieuse nécessité d'employer des CCU(S) pour limiter le dérèglement climatique. Bien que différents projets soient en cours de développement, ces technologies doivent encore répondre à de nombreux défis

(développements techniques, réduction des coûts, déploiement d'infrastructures adaptées, etc.). Par ailleurs, puisque nous ne souhaitons pas nous limiter à une action superficielle, nous devons nous attacher à construire une initiative aussi fédératrice qu'ambitieuse, systémique et interdisciplinaire. De nombreuses opportunités sont encore trop peu explorées : les laboratoires de recherche, académiques ou privés, constituent des viviers d'innovations à faire émerger. Ainsi, il nous semble indispensable de déployer une action européenne forte, et innovante, afin de participer efficacement à l'action collective visant à répondre au défi du siècle.

*« Toutes les trajectoires modélisées à l'échelle mondiale qui limitent le réchauffement à 1,5 °C [...] impliquent des réductions rapides et profondes, et dans la plupart des cas immédiates, des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans tous les secteurs. Les stratégies d'atténuation modélisées permettant d'obtenir ces réductions comprennent le passage des combustibles fossiles sans captage et stockage du carbone (CSC) à des sources d'énergie à très faible teneur en carbone ou à teneur nulle en carbone, comme les énergies renouvelables ou les combustibles fossiles avec CSC, des mesures axées sur la demande et l'amélioration de l'efficacité, la réduction des émissions de gaz autres que le CO₂ et **le déploiement de méthodes d'élimination du dioxyde de carbone.** »*

Ch. 6, WG III, Rapport du GIEC n°6