



Les analyses du Centre Jean Gol

*LA CAPTURE DU CO<sub>2</sub>  
COMME ALLIÉE  
DANS LA  
TRANSITION  
ÉNERGÉTIQUE*

---



FÉDÉRATION  
WALLONIE-BRUXELLES



## *Une analyse réalisée par*

# **DR LIONEL DUBOIS**

*Lionel Dubois, Ingénieur civil Chimiste et Chercheur Senior à l'Université de Mons, est Coordinateur scientifique et de recherche en capture et utilisation du CO<sub>2</sub> au sein du Service de Génie des Procédés Chimiques et Biochimiques de la Faculté Polytechnique. Après avoir obtenu son Doctorat en Sciences de l'ingénieur en 2013 (thèse sur la capture du CO<sub>2</sub> en post-combustion par absorption-régénération appliquée aux fumées issues de cimenteries), il a continué à développer ses activités de recherche dans le domaine de la capture, mais également de l'utilisation du CO<sub>2</sub>, à travers notamment la Chaire Académique ECRA (European Cement Research Academy). Ses activités de recherche se sont traduites par de nombreuses publications et communications scientifiques, ainsi qu'en exposés lors de conférences scientifiques internationales. Depuis octobre 2021, il co-coordonne également le projet DRIVER du Fonds de Transition Energétique Fédéral Belge visant à établir une réelle feuille de route pour l'implémentation d'une chaîne de capture, utilisation et stockage du CO<sub>2</sub> en Belgique.*

**Daniel Bacquelaine**, Administrateur délégué du CJG  
**Axel Miller**, Directeur du CJG  
**Corentin de Salle**, Directeur scientifique du CJG

2022

Avenue de la Toison d'Or 84-86  
1060 Bruxelles  
Tél. : 02.500.50.40  
cjb@cjb.be  
www.cjb.be

*LA CAPTURE DU CO<sub>2</sub>  
COMME ALLIÉE  
DANS LA TRANSITION  
ÉNERGÉTIQUE*

# INTRODUCTION

---

Comme le souligne régulièrement le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique n'a jamais été aussi élevée depuis au moins 2 millions d'années, passant de 315 ppm à la fin des années 1960 à 414 ppm en 2020 [IPCC, 2021]. Le GIEC indique également que l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> au cours de l'ère industrielle est, sans équivoque, due aux émissions des activités humaines. Des actions immédiates sont dès-lors essentielles pour réduire les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> et sa concentration atmosphérique, afin d'empêcher les températures moyennes mondiales d'augmenter de 1,5 à 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels, comme le prévoit l'Accord de Paris. En ce qui concerne la limitation des émissions de CO<sub>2</sub>, plusieurs mesures doivent être prises, telles que la diminution de la consommation d'énergie, tant par le secteur industriel que par la population, grâce à l'amélioration de l'efficacité énergétique, ainsi que l'utilisation d'autres combustibles (par exemple, substitution du charbon, utilisation de la biomasse) ou l'utilisation de sources d'énergie à faible impact carbone (énergies renouvelables, telles que les énergies solaire, éolienne, hydraulique, géothermique ou encore l'énergie nucléaire). De manière complémentaire à ces actions, les procédés de capture (captation ou captage également utilisés) de CO<sub>2</sub> représentent des alliés précieux en matière de transition énergétique.

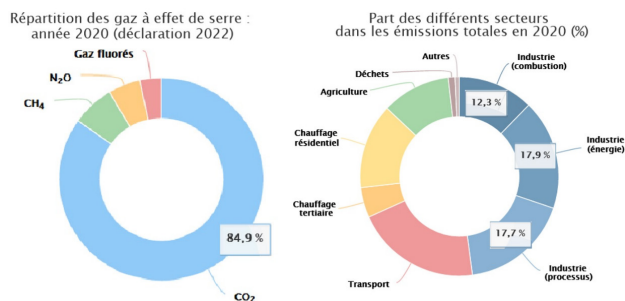






# PROBLÉMATIQUE CO<sub>2</sub> ?

Débutons tout d'abord par rappeler qu'en matière de Gaz à Effet de Serre (GES), le CO<sub>2</sub> est le plus gros contributeur (85% des GES, cf. Fig. 1), bien qu'il soit important de ne pas négliger les autres GES tels que le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) ou encore les gaz fluorés. Afin de prendre en compte l'ensemble des GES, les émissions sont régulièrement exprimées en « CO<sub>2</sub>-équivalents » (CO<sub>2</sub>-equ), chaque GES étant pondéré en fonction de son Potentiel de Réchauffement Global (PRG) (le CO<sub>2</sub> étant pris comme référence son PRG est égal à 1, il vaut par exemple 27,9 pour le CH<sub>4</sub> [IPCC, 2021]). Si l'on s'intéresse aux différents émetteurs de GES en Belgique, comme l'illustre la Fig. 1, près de 50% des émissions proviennent du secteur industriel au sens large, à savoir la production d'énergie (en particulier électrique), la combustion d'éléments fossiles dans l'industrie, et enfin les procédés industriels en tant que tels.

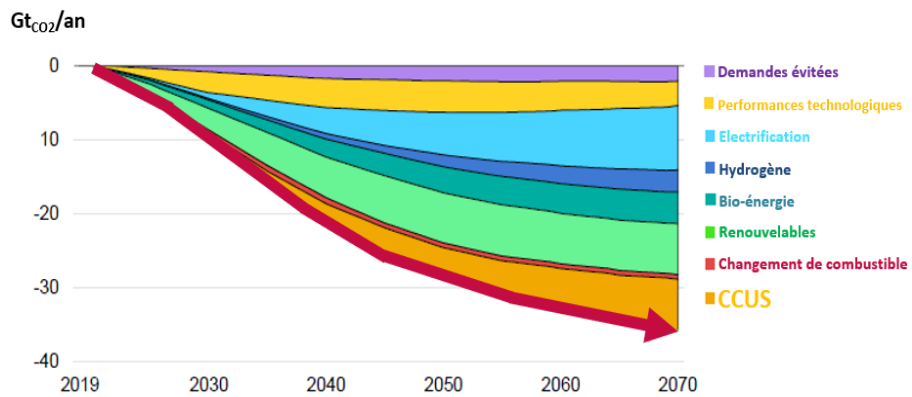


**Figure 1 :** répartition des gaz à effet de serre en termes de types de gaz et de secteurs d'activités.

Source : figure adaptée de [climat.be](https://www.climat.be)

Réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur industriel apparaît donc une nécessité afin d'adresser la problématique de manière efficace. Pour le secteur de l'énergie, comme indiqué en préambule, le passage à des formes de production bas-carbone (renouvelable, nucléaire, hydraulique, géothermique...) est évidemment à privilégier bien que de manière transitoire, l'utilisation de centrales au gaz semble nécessaire. Par ailleurs, plusieurs secteurs industriels conduisent quant à eux à des émissions de CO<sub>2</sub> dites « inévitables », c'est particulièrement le cas des producteurs de chaux et de ciment où deux-tiers des émissions sont liées à la décarbonation de la matière première elle-même (carbonate de calcium – CaCO<sub>3</sub>). Un autre exemple assez révélateur est l'industrie aéronautique où même si l'électrification ou l'utilisation de l'hydrogène sont envisagées à très long terme, à court et moyen termes, cette industrie continuera à émettre de grandes quantités de CO<sub>2</sub>.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), différents leviers existent pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> (cf. Fig. 2), tels que l'amélioration des performances technologiques, l'électrification, l'hydrogène, l'usage de bioénergie et de sources renouvelables, etc. Parmi ces mesures, l'implémentation de la chaîne de Capture, transport, Utilisation et/ou Stockage du CO<sub>2</sub> (CCUS) devrait contribuer pour approximativement 18% dans les mesures de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici à 2050-2070.



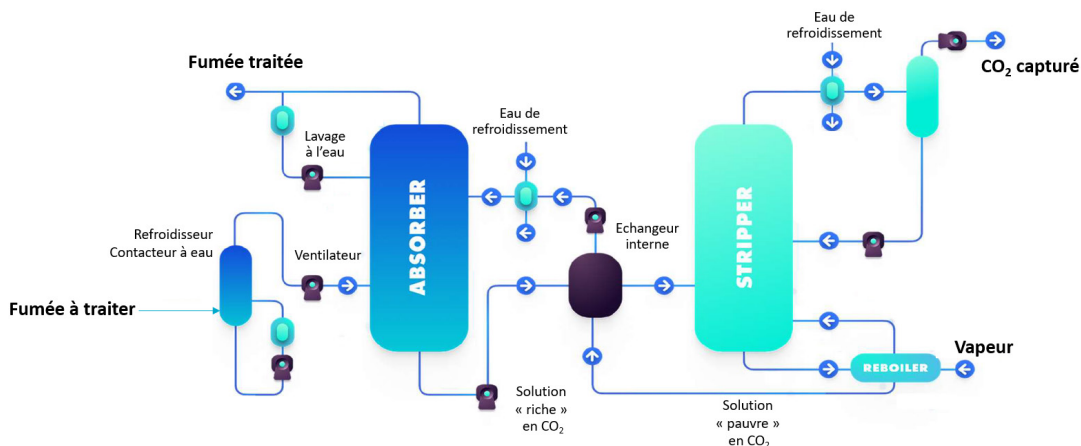
**Figure 2** : voies de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>

Source : figure adaptée de [www.iea.org](http://www.iea.org)

# LA CAPTURE DU CO<sub>2</sub> : QU'ÉSACO ?

Lorsque l'on parle de « capture du CO<sub>2</sub> », on fait référence en réalité à deux catégories de procédés bien différentes : la capture du CO<sub>2</sub> appliquée aux fumées émises par des sites industriels (centrales électriques, cimenteries, chaufourniers, verreries, etc.) et la capture du CO<sub>2</sub> appliquée à l'air ambiant (DAC – Direct Air Capture). Néanmoins, technologiquement le principe est assez similaire : le gaz à traiter (fumée industrielle prétraitée ou l'air ambiant) est envoyé dans un système permettant de séparer le CO<sub>2</sub> des autres composés présents dans la phase gazeuse. Plusieurs technologies existent et utilisent des opérations unitaires différentes (absorption gaz-liquide, adsorption gaz-solide, séparation membranaire, procédé cryogénique, etc.). La technologie la plus mature et disponible commercialement à l'heure actuelle (cf. Fig. 3) est basée sur l'utilisation d'un

liquide (solvant, typiquement un composé aminé à 30%-40% en poids dans de l'eau) qui a la caractéristique de réagir chimiquement avec le CO<sub>2</sub> dans une colonne dite d'absorption. Après chargement en CO<sub>2</sub>, ce liquide est régénéré par augmentation de la température dans une colonne dite de régénération, ce qui permet de libérer le CO<sub>2</sub> capturé et de récupérer un solvant pouvant à nouveau servir pour capturer du CO<sub>2</sub>. Les rapports de l'IEAGHG et du GCCSI (Global CCS Institute) donnent une vision des niveaux de maturité technologique des différentes technologies de capture du CO<sub>2</sub> [IEAGHG, 2019] [Kearns et al., 2021]. Un exemple d'installation de capture de CO<sub>2</sub> appliquée sur des fumées issues d'un centre d'incinération de déchets ménagers aux Pays-Bas est fourni à la Fig. 4.



**Figure 3** : procédé de capture de CO<sub>2</sub> par absorption gaz-liquide

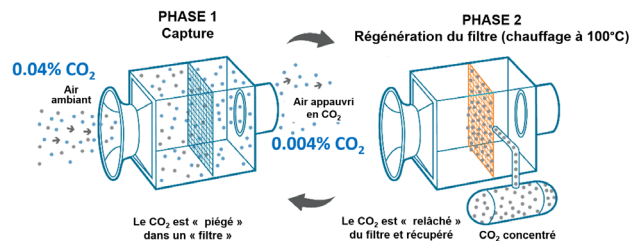
Source : figure adaptée de [www.carbonclean.com](http://www.carbonclean.com)





**Figure 4 :** illustration d'une installation de capture du  $\text{CO}_2$  aux Pays-Bas (centre d'incinération, AVR, Duiven, Pays-Bas, 100 000 tonnes de  $\text{CO}_2$  par an) Source : [www.avr.nl](http://www.avr.nl)

Lorsque l'on capture le  $\text{CO}_2$  dans l'air ambiant, la technologie la plus mature actuellement est basée sur un procédé d'adsorption gaz-solide (cf. illustration à la Fig. 5). L'air à traiter est mis en contact avec un matériau solide dit « adsorbant » qui, tel un filtre, se sature progressivement en  $\text{CO}_2$ . Une fois saturé, ce matériau peut être régénéré (et libérer le  $\text{CO}_2$  capturé) par élévation de température (TSA – Temperature Swing Adsorption) ou par modulation de pression ((V)PSA – (Vacuum) Pressure Swing Adsorption). Un exemple d'une telle installation en Islande est illustré à la Fig. 6.



**Figure 5 :** procédé de capture de  $\text{CO}_2$  de l'air ambiant par adsorption gaz-liquide, Source : figure adaptée de [climeworks.com](http://climeworks.com)



**Figure 6 :** Illustration d'une installation de capture du  $\text{CO}_2$  dans l'air ambiant en Islande (ORCA), 4000 tonnes de  $\text{CO}_2$  par an, Source : [climeworks.com](http://climeworks.com)

En ce qui concerne le bilan environnemental de ce genre d'opérations, de nombreuses études sont réalisées afin d'évaluer l'impact des technologies de capture, tant en termes de bilan carbone, mais également d'usage de ressources fossiles, d'eau, d'autres types d'émissions, etc. Par exemple, [Bisinella et al., 2022] ont réalisé une étude pour une installation identique à celle illustrée aux Fig. 3 et 4 pour le cas des centres d'incinération, permettant de confirmer l'intérêt de ce type d'opération. Pour ce qui est de la capture dans l'air, la review réalisée par [Chauvy et Dubois, 2022] permet à la fois de juger des impacts environnementaux (revue des analyses de cycle de vie réalisées dans la littérature pour différentes technologies de DAC), mais également d'en juger de l'aspect économique via une revue des analyses technico-économiques.

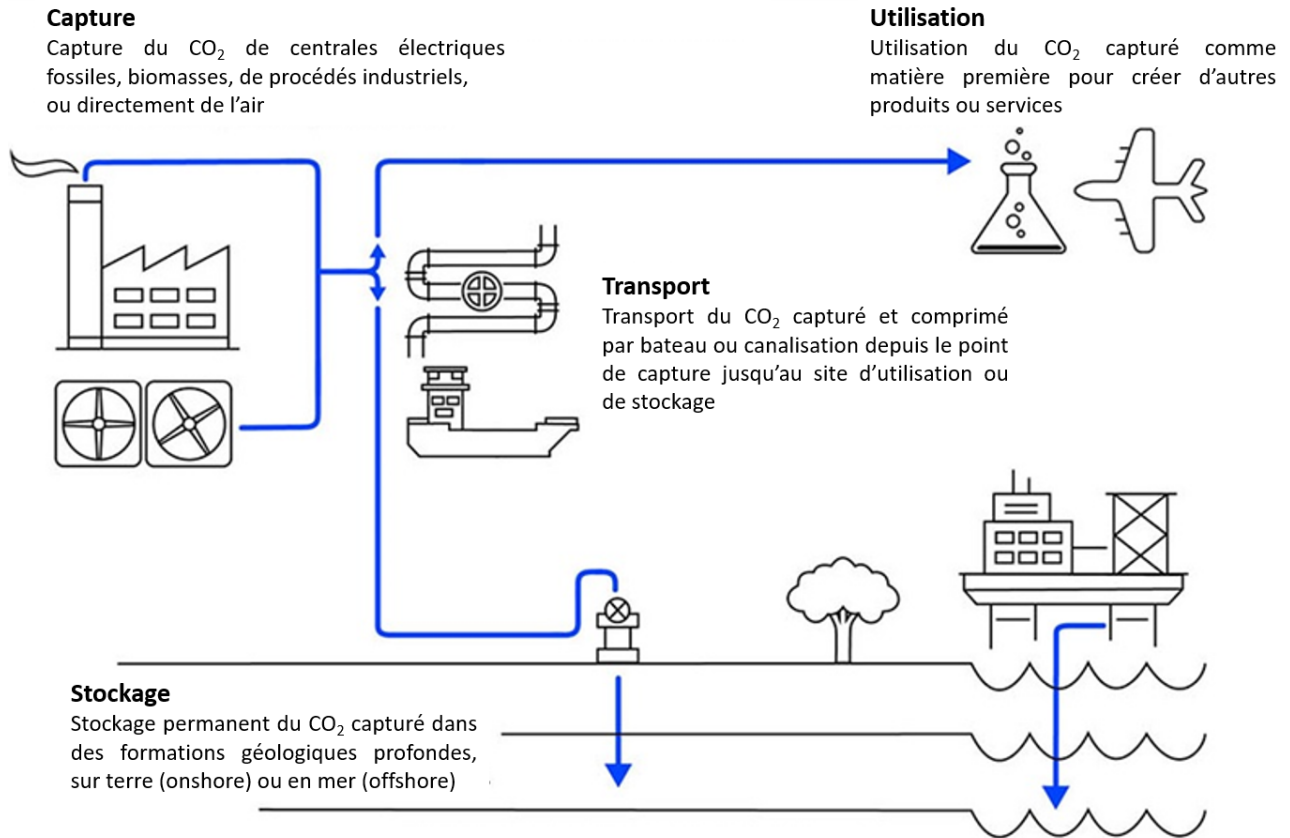
# CO<sub>2</sub> CAPTURÉ, ET APRÈS ?

---

La capture du CO<sub>2</sub>, qu'elle soit appliquée sur sites industriels ou l'air ambiant, s'intègre en réalité dans une chaîne de procédés plus globale appelée « CCUS » (Carbon Capture Utilization and/or Storage), ou « DACCUS » (Direct Air Carbon Capture Utilization and/or Storage). L'acronyme « BECCS » (Bio-Energy with CCS) est également rencontré lorsque la capture est appliquée sur une installation alimentée en biomasse. En effet, comme illustré à la Fig. 7, une fois capturé, le CO<sub>2</sub> doit être comprimé et transporté (par canalisation ou par bateaux) vers un site d'utilisation ou de stockage géologique à très grande profondeur (terrestre – onshore ou marin – offshore). Les sites de stockage les plus classiques sont des veines de charbon non exploitées, des gisements de pétrole ou de gaz en fin d'exploitation, ou encore des aquifères salins profonds.

Comme l'indique le Global CCS Institute, le potentiel de stockage géologique est estimé entre 2000 et 20 000 GtCO<sub>2</sub> (en guise de comparaison, les émissions totales de CO<sub>2</sub> au niveau planétaire s'élèvent à 40 GtCO<sub>2</sub> annuellement). Bien que le risque zéro n'existe pas (par exemple par rapport au relargage de CO<sub>2</sub> séquestré), le stockage géologique du CO<sub>2</sub> est bien maîtrisé depuis de nombreuses années et peut être considéré comme sûr.

A plus long terme, conjointement avec le développement des infrastructures de production et de transport d'hydrogène vert (i.e. produit par électrolyse de l'eau avec de l'énergie renouvelable), le CO<sub>2</sub> capturé pourra être ré-utilisé afin de créer une économie du carbone et circulaire. Comme analysé par [Chauvy et De Weireld, 2020], les voies les plus envisagées à l'heure actuelle sont la conversion du CO<sub>2</sub> en e-méthanol ou e-méthane (ou SNG – Synthetic Natural Gas), l'e-kérosène présentant également un potentiel important. D'autres voies de valorisation sont également possibles, ainsi que la minéralisation du CO<sub>2</sub> pour former des matériaux de construction. L'estimation du potentiel d'utilisation du CO<sub>2</sub> capturé varie dans la littérature, allant de 200 MtCO<sub>2</sub> par an [Aresta et al., 2013] à près de 500 MtCO<sub>2</sub> par an [Chauvy et al., 2019] excluant les applications à grande échelle telles que les carburants à base de CO<sub>2</sub>. En les incluant, jusqu'à 10 % du CO<sub>2</sub> anthropique pourrait théoriquement être utilisé [Aresta, 2019]. Selon l'IEA, près de 230 MtCO<sub>2</sub> sont actuellement utilisés dans le monde dont 16% en Europe. Près de 60% du CO<sub>2</sub> mondial est actuellement utilisé pour la production d'urée, 34 % pour la récupération assistée du pétrole (EOR – Enhanced Oil Recovery) et enfin tout ce qui concerne l'alimentation et les boissons gazeuses (principale utilisation pour Europe).

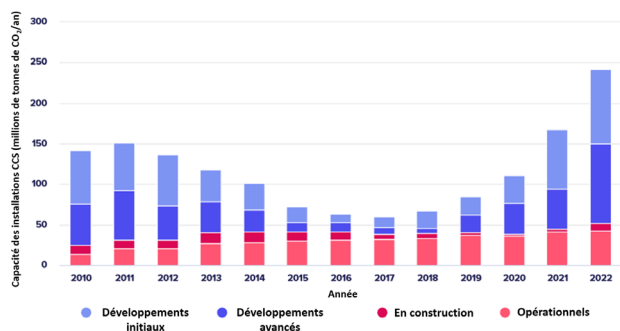


**Figure 7 :** Illustration de la chaîne de Capture, transport, Utilisation et/ou Stockage de CO<sub>2</sub> (CCUS)

Source : figure adaptée de [www.iea.org](http://www.iea.org)

# CAPTURE DU CO<sub>2</sub> : OÙ EN EST-ON ?

Le nombre de projets de capture, transport, utilisation et/ou stockage du CO<sub>2</sub> à travers le monde est en nette croissance ces dernières années (cf. Fig. 8). En effet, selon le Global CCS Institute, 61 nouveaux projets ont vu le jour en 2022 et 30 très gros projets CCUS sont opérationnels dans le monde (majoritairement en Amérique du Nord), 11 en construction, et 153 en développement (dont plusieurs en Europe, 5 à 9 ans étant nécessaires pour la mise en service d'une installation complète CCUS). Citons par exemple l'important projet « Northern Lights » en cours d'établissement en Norvège, il permettra d'y acheminer du CO<sub>2</sub> capturé sur plusieurs sites à travers l'Europe afin de le transporter vers un site de stockage géologique.



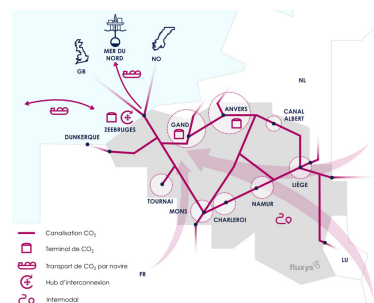
**Figure 8 :** Capacités mondiales en matière de projets CCS actuels et futurs

Source : figure adaptée de [status22.globalccsinstitute.com](https://status22.globalccsinstitute.com)

Et quid de la capture du CO<sub>2</sub> en Belgique ? Près de 50% des émissions de CO<sub>2</sub> belges étant liées aux secteurs industriels au sens large, et en particulier des émetteurs (tels que les cimentiers ou chauffourniers) disposant d'une grande part d'émissions dites « inévitables », il est indéniable que pour

respecter les objectifs en termes de limitation d'émissions de CO<sub>2</sub>, l'implémentation du CCUS apparaît inéluctable. Plusieurs projets liés à la capture-utilisation de CO<sub>2</sub> ont donc vu le jour ces dernières années, tant auprès des acteurs industriels que de la recherche.

Hormis pour la décarbonation « intra-procédé » intervenant dans certaines industries comme la pétrochimie ou les producteurs d'engrais, il n'y a pas encore de réelle « grande installation CCUS » en Belgique. Néanmoins, les projets actuels devraient contribuer à y parvenir dans les prochaines années pour autant que les infrastructures de transport de CO<sub>2</sub> soient suffisamment développées. Pour ce faire, comme représenté à la Fig. 9, l'opérateur de transport de gaz belge Fluxys travaille à la mise en place d'un tel réseau en Belgique.



**Figure 9 :** Illustration du futur réseau CO<sub>2</sub> en Belgique (version d'Octobre 2022), Source : figure extraite de [fluxys.com](https://fluxys.com)

De cette façon, le CO<sub>2</sub> capturé sur différents sites belges pourra être acheminé vers différents hubs (Zeebruges, Dunkerque ou encore Anvers) afin d'être ensuite transporté vers un site d'utilisation ou de stockage géologique.

# FINALEMENT, EN QUOI LA CAPTURE DU CO<sub>2</sub> EST UNE ALLIÉE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ?

---

Il est tout d'abord important de rappeler que « le meilleur CO<sub>2</sub> capturé est celui que l'on a pas émis », donc il ne faut pas voir la capture du CO<sub>2</sub> comme un moyen de continuer le « business as usual » et de ne pas mettre en place d'autres actions (améliorations en termes d'efficacité énergétique, meilleurs usages énergétiques, développement de produits alternatifs, etc.) mais bien qu'elle doit permettre, à court-moyen terme, de pouvoir plus rapidement réaliser la transition énergétique, tout en créant les industries de demain, de nouvelles chaînes de valeur, avec à la clé des créations d'emplois. La recherche scientifique a également un rôle important à jouer pour améliorer les technologies et réduire leur coût. En effet, le CCUS se heurte à deux freins principaux actuellement :

- d'une part au niveau économique : en effet, bien que le prix du quota de CO<sub>2</sub> (ETS – Emission Trading Scheme, sorte de taxe que doivent payer les principaux industriels pour chaque tonne de CO<sub>2</sub> émise) a augmenté ces dernières années (entre 70 et 90 €/tCO<sub>2</sub>) ce qui est clairement un incitant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> pour les industriels (via la capture notamment), il faut y ajouter les coûts de compression, transport et stockage/valorisation, ce qui conduit à un coût total dépassant les 100 €/tCO<sub>2</sub>, voir même jusqu'à 150 €/tCO<sub>2</sub>, à savoir toujours plus élevé que le prix du quota de CO<sub>2</sub>. Notons néanmoins que le coût est fonction de plusieurs facteurs comme le type de fumées (leur concentration en CO<sub>2</sub>), la technologie, la localisation, etc. ;
- d'autre part au niveau infrastructurel : le réseau de CO<sub>2</sub> présenté à la Fig. 9 n'existe pas encore, ce qui implique qu'actuellement le transport de grandes quantités de CO<sub>2</sub> n'est pas facilité (par exemple nécessité de valoriser le CO<sub>2</sub> ou le liquéfier sur site, le transporter par camions ou par barges fluviales, limitant les quantités transportables).

La capture du CO<sub>2</sub> a également un rôle primordial pour la décarbonation d'industries disposant d'émissions dites « inévitables » tels que les cimentiers, chaudières, verriers, sidérurgistes, etc. A plus long terme, la capture du CO<sub>2</sub> dans l'air ambiant (DAC) aura également un rôle à jouer, notamment pour la production de carburants synthétiques destinés aux industries difficilement décarbonables comme l'aviation (e-kérosène). Par ailleurs, il sera toujours important de s'assurer de l'impact environnemental réel de chaque opération de façon à éviter que celle-ci ne soit finalement que du « greenwashing », ce qui n'est clairement pas l'objectif à viser pour le CCUS.

Il apparaît donc clair que le développement de la filière de capture, transport, stockage et/ou utilisation de CO<sub>2</sub> ne dépend pas que de facteurs purement technologiques et n'est pas que du ressort des émetteurs industriels de CO<sub>2</sub>, mais repose également sur des aspects économiques, stratégiques, voir même politiques.



# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

Aresta M., An Economy Based on Carbon Dioxide and Water, Springer, Cham, 2019, pp. 431–436.

Aresta M., Dibenedetto A., Angelini A., J. CO<sub>2</sub> Util. 2013, 3–4, 65.

Bisinella V., Nedenskov J., Riber C., Hulgaard T., Christensen T.H., Environmental assessment of amending the Amager Bakke incineration plant in Copenhagen with carbon capture and storage, Waste Manag. Res. 40 (2022) 79–95.

Chauvy R., De Weireld G., CO<sub>2</sub> Utilization Technologies in Europe: A Short Review, Energy Technol. 2000627 (2020) 1–17. [doi.org/10.1002/ente.202000627](https://doi.org/10.1002/ente.202000627).

Chauvy R., Dubois L., Life cycle and techno-economic assessments of direct air capture processes: An integrated review, Int. J. Energy Res. 46 (2022) 10320–10344. [doi.org/10.1002/er.7884](https://doi.org/10.1002/er.7884).

Chauvy R., Meunier N., Thomas D., De Weireld G., Appl. Energy 2019, 236, 662.

IEAGHG, Further Assessment of Emerging CO<sub>2</sub> Capture Technologies for the Power Sector and their Potential to Reduce Costs, , 2019–09(September), 2019.

IPCC, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, Caud N, Chen Y. (2021) 3949.

Kearns, D., Liu, H., & Consoli, C., Technology Readiness and Costs of CCS Technology, 2021.

## SITES INTERNET

Le site de la société AVR (Pays-Bas) spécialisée dans le « Waste-to-Energy » : [www.avr.nl](http://www.avr.nl)

Le site fédéral belge pour d'information sur les changements climatiques : [climat.be](http://climat.be)

Le site de la société Climeworks commercialisant des systèmes de DAC : [climeworks.com](http://climeworks.com)

Le site de l'opérateur gazier belge Fluxys : [www.fluxys.com](http://www.fluxys.com)

Le site de l'Agence Internationale de l'Energie : [www.iea.org](http://www.iea.org)

Le site de l'Institut mondial travaillant sur le CCS : [status22.globalccsinstitute.com](http://status22.globalccsinstitute.com)



*Avenue de la Toison d'Or 84-86  
1060 Bruxelles*

*02.500.50.40  
info@cjg.be*

*www.cjg.be*



FÉDÉRATION  
WALLONIE-BRUXELLES