

Valorisation chimique du dioxyde de carbone

Janv.
2024



AAP ZIBAC -
Utilisation CO₂

Les résultats des études conduites dans le cadre du programme ZIBaC sont avant tout le reflet de la vision du collectif d'industriels. Ces trajectoires apportent une contribution structurante à l'élaboration des stratégies nationales de décarbonation, mais ne représentent pas une vision établie de ces stratégies.

Enjeux et opportunités industrielles

Le **dioxyde de carbone (CO₂)** est produit par nombre d'industries (cimenteries, aciéries, usines de papier...), les transports et les combustibles de chauffage (bois, fioul, gaz), est traditionnellement **considéré comme un déchet rejeté dans l'atmosphère**. Dans les cas où sa concentration émise dans les effluents est importante, ce gaz peut être capté et valorisé. De statut de déchet, il devient alors **une ressource potentielle pour l'industrie**.

Cette veille scientifique menée dans le cadre de L'étude **ZIBAC n°...** dresse un panorama des **opportunités industrielles offertes par la valorisation chimique du CO₂** pour synthétiser différentes **molécules de haute valeur ajoutée** et dont les débouchés existent déjà : alcools (méthanol, éthanol, propanol...), acides en particulier l'acide formique, mélanges d'alcane soit pour l'essence C5-C11 soit le kérosène C8-C16, oléfines, urée, carbonates organiques, etc.

Un défi énergétique majeur

Le **dioxyde de carbone (CO₂)** est une molécule très stable, au **degré d'oxydation le plus haut du carbone**. Il en découle directement une **consommation d'énergie élevée** pour toutes transformations liées à sa réduction, d'autant plus si les composés ciblés sont à très bas degré d'oxydation (alcane, oléfines), **impactant grandement la rentabilité de ce type de conversion**. En revanche, les composés pour lesquels le dioxyde de carbone sera peu réduit (acide formique), voire utilisé sans réduction comme l'urée ou les carbonates organiques, donneront accès à moindre coût à des molécules **de haute valeur ajoutée**.

Des sources variées et un enjeu territorial fort

Présent à seulement 0,042 % dans l'atmosphère (environ 420 ppm), le CO₂ est difficile et coûteux à capter directement dans l'air. Les **sources concentrées** — effluents d'aciéries, cimenteries, usines de papier ou réseaux de chaleur urbains — sont donc privilégiées, malgré leurs contraintes (haute température, vapeur d'eau, gaz corrosifs). Le territoire normand dispose en outre de **sources de CO₂ de haute pureté**, issues notamment de la **méthanisation de biomasse** ou de la **fermentation pour la production d'éthanol**. Ces gisements locaux représentent un atout majeur, bien que leur **dispersion géographique** pose un défi logistique de collecte et de transport.

La chimie du CO₂ : un savoir-faire à renouveler pour relever de nouveaux défis

La chimie du dioxyde de carbone est connue depuis environ un siècle, mais son exploitation industrielle reste limitée à deux exemples : l'urée et l'acide salicylique. Plus récemment, des usines de **transformation en méthanol à l'échelle industrielle** (env. 100000 t/an) ont vu le jour, comme en Islande, Norvège ou Chine. Si le méthanol est employé comme carburant, cette réduction peut être vue comme une **conversion énergétique avec stockage chimique**. Le méthanol est aussi un intermédiaire très important pour l'industrie chimique, pour la production d'esters, d'éthanol, formaldéhyde, acide acétique, etc.

La R&D actuelle consacrée au CO₂ cible de nombreux composés, à un stade de maturité technologique (TRL) très varié. Lorsqu'il s'agit de **processus réductifs**, la rentabilité est fortement grevée par le **coût de l'énergie**, en particulier celui de l'électricité lorsqu'on utilise de l'hydrogène issu de l'électrolyse.

Des voies prometteuses : syngas, acide formique, éthanol et lignine

- Ainsi, les **composés peu réduits** apparaissent comme les plus rentables. Parmi eux, un composé important pour l'industrie est **le gaz de synthèse (CO + H₂)**, qui peut être issu d'une **co-électrolyse de CO₂ + H₂O**, voire de la **pyrolyse de déchets organiques** : plastiques, biomasse... Ce **syngas** est utilisé pour produire du **méthane**, **méthanol**, des **aldéhydes** et leurs alcools obtenus par une **réduction supplémentaire**, et nombre d'autres composés dont la production est bien maîtrisée.
- Un autre produit impliquant une **réduction modérée** est **l'acide formique**, de moindre production (**1 Mt/ an à l'échelle mondiale**), mais d'une **rentabilité intéressante**. Les avancées récentes des chercheurs ont permis d'augmenter significativement **l'efficacité des processus d'électrolyse**, technique amenée à concurrencer la voie thermique utilisant l'hydrogène. De **TRL de 4 à 8**, ces procédés ont montré **la faisabilité d'électrodes de forte densité de courant** (env. 200 mA/cm²), nécessaire à un développement industriel.
- Une autre cible de développement est **l'éthanol, carburant alternatif et intermédiaire clé** de l'industrie chimique. Sa production traditionnelle par **fermentation alcoolique** mobilise des surfaces agricoles et consomme beaucoup **d'eau**. Pour y remédier, des **alternatives** émergent, notamment la **fermentation du gaz de synthèse (syngas)** issu du CO₂, déjà exploitée industriellement.

— comme en Belgique, où une usine produit 125 000 t/an d'éthanol à partir du syngas d'une aciérie. D'autres voies, encore à petite échelle, utilisent la **catalyse hétérogène** ou l'**électrolyse** pour réduire directement le CO₂ en éthanol.

- Moins avancée mais prometteuse, la **valorisation conjointe de la lignine et du CO₂** offre une piste innovante. Environ 1,1 Mt de lignine sont incinérées chaque année en France, alors qu'elle contient des groupements méthoxy aisément convertibles en **molécules à haute valeur énergétique**. Des recherches montrent qu'un mélange CO₂/H₂, sous catalyse métallique, peut transformer la lignine en **éthanol** en intégrant le **monoxyde de carbone (CO)** formé dans ses groupements méthoxy. Cette voie exploite une ressource abondante tout en réutilisant le CO₂.

Des carburants synthétiques par catalyse tandem

Toujours dans le domaine des processus réductifs, la production directe d'**essence C5-C11** et de **kérosène C8-C16** a été également fortement étudiée. Dans ce domaine, des productions à l'échelle pilote (1000 t/an) ont vu le jour en particulier en Chine. Les procédés les plus innovants combinent réduction du CO₂ et synthèse Fischer-Tropsch ou MTO (methanol-to-olefin) au sein d'un **même réacteur** : une approche dite de **catalyse tandem**. Cependant, ces procédés restent peu rentables à ce jour : les pertes d'hydrogène (2/3 consommés sans être incorporés au produit final) limitent leur compétitivité face aux hydrocarbures fossiles. C'est pourquoi les molécules peu réduites constituent un enjeu plus réaliste lorsque l'on envisage de valoriser chimiquement le dioxyde de carbone.

Molécules stratégiques : urée et carbonates organiques

Les molécules dont le **degré d'oxydation est similaire à celui du CO₂** sont les plus pertinentes à court terme.

- **L'urée**, utilisée comme engrais ou additif industriel (panneaux, AdBlue), peut intégrer du CO₂ capté tout en valorisant l'hydrogène vert issu de l'électrolyse ou de l'énergie nucléaire.
- **Les carbonates organiques**, en particulier le **diméthyle carbonate (DMC)**, connaissent un fort développement dans le secteur des **batteries et supercondensateurs**, moteurs de la mobilité électrique. Ces composés séquestrent durablement le CO₂ et affichent une **croissance annuelle de 5 à 10 %**. Les recherches actuelles visent à produire directement ces carbonates à partir du **mélange CO₂ + méthanol**, ouvrant la voie à des procédés plus sûrs, plus propres et économiquement viables.

Cette veille bibliographique a été conduite en privilégiant **les voies de valorisation chimique du CO₂ présentant le meilleur compromis entre faisabilité technologique, rentabilité et impact énergétique**. Les molécules faiblement réduites ou ne nécessitant pas de réduction, telles que **l'urée, les carbonates organiques, l'acide formique ou l'éthanol issu de syngas**, apparaissent comme les cibles les plus pertinentes à court et moyen terme.

La région normande présente un **fort potentiel industriel pour la mise en œuvre de ces technologies** :

- Sources locales concentrées de CO₂ : **papeteries, cimenteries, méthaniseurs de biomasse**.
- Disponibilité de **matières premières secondaires** comme la lignine, sous-exploitée et abondante.
- Proximité des **infrastructures industrielles et logistiques** facilitant la collecte et la transformation.

En combinant ces atouts du territoire avec le développement de procédés économiquement compétitifs, la valorisation chimique du CO₂ pourrait devenir **un levier efficace de transition industrielle, de création de valeur et de réduction des émissions régionales**.

CITATION DE CE RAPPORT

Laurent Bischoff, Alain Ledoux, Laurent Levacher pour COBRA
Carnot I2C, Bruno PETAT SOCRATE Axe Seine

Responsable scientifique : Laurent Bischoff

« Valorisation chimique du Dioxyde de Carbone » 2025 – 53 pages

Cette synthèse est disponible en ligne sur le site

<https://www.socrate-axeSeine.fr/>

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé

BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01

Étude réalisée par : Laboratoire COBRA Carnot I2C Rouen **pour le compte de l'ADEME.** Cabot, Chevron, CIM, GRDF, Natran, Haropa Port, Lubrizol, Qair, Tepsa, Sedibex, SEVEDE, Sogestran, Trapil

Coordination technique - ADEME : Ambre DURAND

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.