

Sciences et technologies

LE CO₂ COMME SOLUTION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : AVANCÉES TECHNOLOGIQUES DANS LES SYSTÈMES THERMIQUES

Sébastien Poncet

Professeur du Département de génie mécanique
Université de Sherbrooke

Le 12 mai 2019, la concentration en CO₂ dans l'atmosphère terrestre a atteint le chiffre de 415,39 ppm (parties par millions), un niveau record depuis plus de 3 millions d'années. Le niveau des mers et les températures étaient alors plus élevés de 15 mètres et de 4° Celsius, respectivement. Les deux principales différences avec la situation actuelle sont, d'une part, que le CO₂ avait mis des millions d'années à s'accumuler à l'époque et, d'autre part, que le rayonnement solaire total était alors plus faible. Foster, Royer et Lunt (2017) prédisent un taux de CO₂ dans l'atmosphère d'environ 2 000 ppm en 2250 si toutes les réserves de combustible fossile sont entièrement utilisées.

Le dioxyde de carbone est un gaz à effet de serre (GES) qui retient dans les basses couches atmosphériques une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre vers l'espace. En atteignant une concentration en CO₂ de 400 ppm, la température moyenne terrestre a gagné un degré en un siècle. Au Québec, l'augmentation des GES pourrait se traduire, d'ici 2050, par une hausse des températures susceptible d'atteindre 5 °C au sud de la province et 9 °C au nord de celle-ci, où le phénomène est amplifié par la fonte du pergélisol.

La valorisation du CO₂ peut faire partie de la solution pour réduire l'impact environnemental des activités humaines dans les domaines de l'industrie, des transports, ou du bâtiment, entre autres exemples, mais, pour y parvenir, encore faut-il pouvoir le retirer, et ce, à grande échelle.

Capter, stocker et valoriser le CO₂

Les technologies de captage et de stockage du dioxyde de carbone représentent un fort potentiel de réduction des quantités de GES contenus dans l'atmosphère. Les usines de traitement de gaz, d'incinération des déchets ou les centrales thermiques, qui produisent plus d'un million de tonnes en équivalent de CO₂ par an, constituent des lieux de prédilection pour le captage. Mais isoler le CO₂ des fumées demeure une étape techniquement complexe, dont le coût est encore très élevé. Au Canada, l'entreprise Enhance Energy a mis en place un dispositif de captage du CO₂ à la raffinerie de pétrole Sturgeon, au nord d'Edmonton. Une fois capté, il est compressé sous forme liquide, puis acheminé dans un champ pétrolier où il est injecté dans les puits de pétrole en fin de vie afin de faciliter l'extraction.

Les sites les plus appropriés pour un stockage à long terme sont principalement les formations géologiques comme les gisements de pétrole, de gaz ou de méthane, les aquifères salins profonds (>800 m), les cavernes de sel, voire le stockage en mer. Le dioxyde de carbone peut aussi être entreposé dans des matériaux de construction comme le ciment, ce qui a été testé par l'entreprise Lafarge Canada dans l'Ouest canadien. D'ailleurs, cela a permis d'augmenter la durabilité des bétons tout en réduisant leur empreinte carbone.

Une fois stocké, le CO₂ peut être valorisé comme matière première pour produire des carburants ou des produits chimiques (engrais, plastiques, médicaments), ou, dans une moindre mesure, dans l'élaboration de boissons gazeuses, ou pour favoriser la croissance de micro-algues, pour ne citer que quelques exemples. Hepburn *et al.* (2019) proposent une revue détaillée et critique des différentes voies de valorisation du CO₂ en intégrant les aspects politico- et technico-économiques. Plus loin dans cet article, on s'intéressera à son utilisation, sans transformation, comme fluide caloporteur dans les systèmes thermiques. L'objectif de cet article est de donner un aperçu de certaines technologies prometteuses fonctionnant au CO₂ et de démontrer que ce fluide fait aussi partie des solutions pour répondre au problème des changements climatiques.

Le CO₂, un réfrigérant naturel

LE RETOUR DU CO₂

Selon l'Agence néerlandaise d'évaluation environnementale, en raison de la hausse de la demande mondiale d'énergie pour des facteurs économiques, démographiques ou sociétaux, le besoin pour la réfrigération dépassera celui du chauffage d'ici 2060. Cela s'explique par le réchauffement climatique, mais aussi par l'émergence de nouveaux besoins, comme le refroidissement des centres de données. En même temps, des initiatives internationales tentent d'éliminer progressivement l'utilisation des hydrofluorocarbones (HFC), qui présentent un fort potentiel de réchauffement planétaire (PRP). En 2018, le gouvernement canadien a lancé un plan visant à limiter la consommation de HFC de 85 % d'ici 2036. Il comprend l'élimination progressive des HFC à fort PRP pour certains systèmes de réfrigération à partir de janvier 2020.

À ce titre, le dioxyde de carbone est réapparu comme un fluide frigorigène naturel alternatif (R744). Déjà largement utilisé entre 1881 et 1960, il avait été détrôné par les chlorofluorocarbones (CFC), hydrochlorofluorocarbones (HCFC) et HFC. La prise de conscience planétaire des enjeux environnementaux a permis la réintroduction du CO₂ dans les domaines de la réfrigération et des systèmes thermiques en général (Pearson, 2005).

PROPRIÉTÉS DU CO₂

Le dioxyde de carbone est un réfrigérant naturel avec un PRP qui vaut par définition 1 et un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) nul, ce qui le rend particulièrement attractif par rapport aux autres réfrigérants (Tableau 1). Il est à noter que le PRP est une mesure de la capacité de chaque gaz à effet de serre à piéger la chaleur dans l'atmosphère, normalisée par la valeur équivalente en dioxyde de carbone. À titre d'exemple, le R12 piège 10 900 plus la chaleur que le CO₂. Le PACO, quant à lui, est une mesure relative de la capacité d'un produit chimique à détruire l'ozone, normalisée par rapport au potentiel destructeur du CFC-11. Le propane (R290) et l'ammoniac (R717) présentent des PRP et PACO faibles, mais le premier est hautement inflammable (classe A3 selon l'ASHRAE), alors que le second est toxique et faiblement inflammable (A2L). De son côté, le R744 (CO₂) est de classe A1: ininflammable (il est d'ailleurs utilisé comme gaz extincteur) et non toxique.

Réfrigérant	PRP	PACO	Toxicité / Inflammabilité	Durée de vie dans l'atmosphère (années)
R744 (CO ₂)	1	0	A1	29 300 – 36 100
R12	10 900	1	A1	~100
R22	1 790	0.05	A1	11.9
R134a	1 370	0	A1	13.4
R410a	2 100	0	A1	17
R245fa	1 050	0	B1	7.2
R290 (propane)	3	0	A3	12
R717 (ammoniac)	0	0	B2L	<0.02

Tableau 1. Comparaison de différents réfrigérants usuels en termes de PRP, PACO, inflammabilité, toxicité et durée de vie dans l'atmosphère. Classe A : non toxique, B : toxique, 1 : ininflammable, 2L : très peu inflammable (combustion lente et difficile à initier), 2 : faiblement inflammable, 3 : hautement inflammable.

Le dioxyde de carbone présente de nombreux autres avantages : grande disponibilité, non-corrosif, compatibilité avec tous les matériaux et peut être utilisé dans l'agro-alimentaire pour la congélation par contact. Ses principaux inconvénients sont qu'au contact de l'eau, il peut former des acides et du carbonate d'ammonium, au contact de l'ammoniac.

En termes de propriétés thermophysiques, le CO₂ a une température critique de 31,1 °C et une pression critique de 73,8 bar. Il possède également une faible viscosité dynamique, une haute conductivité thermique, une haute capacité calorifique (état liquide), de faibles volumes massiques et de grandes chaleurs latentes de changement d'état. Il est donc principalement utilisé en froid industriel en mode sous-critique comme dans les tunnels de congélation par exemple. Ces installations ont alors une production frigorifique par unité de volume plus élevée que pour d'autres réfrigérants ou à puissance égale, une taille réduite.

Le CO₂ dans le domaine de la réfrigération

Le dioxyde de carbone remplace de plus en plus les réfrigérants synthétiques utilisés dans les systèmes de réfrigération, de conditionnement d'air et les pompes à chaleur. L'utilisation de CO₂ comme fluide secondaire dans les systèmes de réfrigération de supermarché ou les patinoires peut minimiser l'utilisation de fluides secondaires conventionnels, réduire la consommation énergétique des pompes et augmenter les transferts thermiques dans les échangeurs de chaleur.

À l'heure actuelle, les recherches s'intéressent aux coulis d'hydrates de CO₂, forme de barbotine contenant de l'eau et des cristaux d'hydrates de CO₂. Ce sont des matériaux

ayant une grande capacité de transport d'énergie sous forme de chaleur latente, soit lors de leur transformation d'hydrates à liquide pour des températures allant de 0 à 15 °C. Cela les rend particulièrement adaptés pour le conditionnement d'air (Dufour *et al.*, 2019). Un deuxième axe se regroupe autour des cycles de réfrigération ou de pompe à chaleur au CO₂ transcritique (ni liquide ni gazeux) qui opèrent sous de très hautes pressions. Bien que cela augmente drastiquement la complexité de ces systèmes et donc leur prix, et implique de plus basses performances que les cycles classiques, ils peuvent devenir plus performants s'ils intègrent un éjecteur ou un tube à vortex, deux dispositifs mécaniques sans pièce mobile, simples à fabriquer, à bas coût et ne requérant aucun entretien.

Les éjecteurs sont des doubles tuyères utilisées habituellement pour mélanger des fluides et/ou les comprimer. Lorsqu'on les intègre dans un cycle de réfrigération ou de pompe à chaleur, des augmentations du coefficient de performance (COP= rapport entre la quantité d'énergie utile produite et la quantité d'énergie utilisée et « payante » pour faire fonctionner le système) allant jusqu'à 28 % ont été obtenues expérimentalement (Yu *et al.*, 2019). Un éjecteur transcritique au CO₂ a été notamment intégré avec succès au niveau de l'évaporateur dans un système de conditionnement d'air d'une Toyota Prius (Figure 1a). Grâce aux fortes pressions d'opération, les pompes à chaleur au CO₂ présentent l'avantage d'être aussi plus compactes que celles utilisant des réfrigérants synthétiques.

Un tube à vortex peut être utilisé pour le chauffage, le refroidissement ou pour les deux fonctions simultanément. Un flux de gaz comprimé pénètre le tube, sort d'un côté sous la forme d'un flux de gaz froid et, de l'autre, sous la forme d'un flux de gaz chaud dans des proportions pouvant être contrôlées. Par des modèles thermodynamiques simples, il a récemment

été démontré que leur intégration dans des cycles de réfrigération ou de pompe à chaleur pouvait permettre d'augmenter leur COP de 50 % et 17 %, respectivement, en utilisant du CO₂ transcritique. Comme pour les éjecteurs, le tube à vortex permet de réduire les pertes d'énergie utile dues à la nature transcritique du CO₂ dans la vanne de détente (Yu *et al.*, 2019). Il peut être particulièrement intéressant dans une usine lorsqu'il y a un besoin simultané de chaud pour le processus industriel et de froid pour la climatisation d'une zone de bureaux, par exemple.

À l'heure actuelle, la principale limitation à leur introduction sur le marché est la difficulté de concevoir des éjecteurs et des tubes à vortex optimaux avec de faibles variations de leur géométrie affectant grandement leurs performances.

Le CO₂ comme milieu de stockage énergétique

Les systèmes de stockage d'énergie sous la forme de dioxyde de carbone comprimé ont récemment attiré l'attention des chercheurs. Ils permettent de valoriser ce gaz directement sur le site de stockage sans avoir à le transformer. Ces dispositifs sont un moyen efficace de pallier le caractère intermittent des sources d'énergie renouvelable à grande échelle. Les technologies de captage et les moyens de stockage étant déjà bien connus, cela constitue une piste de solution intéressante de valorisation du CO₂ par l'ajout simple d'un système de détente (turbine). Cette technologie est largement inspirée des systèmes de stockage par air comprimé qui ont déjà démontré leur pertinence à travers les deux sites d'Huntorf (Allemagne, 290 MW) et de McIntosh (USA, 110 MW) en fonctionnement depuis 1978 et 1991, respectivement.

Actuellement, il n'existe aucun dispositif expérimental à grande échelle capable de quantifier les performances de tels systèmes au CO₂. Alami *et al.* (2019) ont développé un banc à l'échelle du laboratoire de 21 l opérant à des pressions de 3 bar et sans échangeur de chaleur (Figure 1b). L'efficacité de leur système atteint 79 % et à puissance donnée, il requiert 65 % de volume de stockage en moins que son équivalent en air. Les chercheurs ont, jusqu'à présent, principalement focalisé leur attention sur des modèles thermodynamiques et des analyses thermo-économiques afin d'en évaluer les performances et la pertinence économique. Liu *et al.* (2020) ont démontré récemment, via un algorithme génétique, qu'une efficacité globale de 60,5 % pouvait être atteinte pour un coût d'électricité produite de 0,23 USD/kWh. Cela est particulièrement intéressant à petite échelle pour les sites isolés du réseau électrique principal ou des États comme Hawaï, dont les coûts d'électricité fluctuent et sont très élevés, de l'ordre de 0,317 USD/kWh en avril 2020, chiffre à comparer aux 0,0608 CAD/kWh (0,46 USD/kWh) au Québec. Hao *et al.* (2020) ont étudié théoriquement la pertinence d'un système de 10 MW ayant une efficacité globale de 65 %. Leurs résultats montrent que les coûts d'investissement restent élevés en raison de la complexité du système, à moins que des cavernes naturelles ou des mines puissent être utilisées pour stocker le CO₂ comprimé. À grande échelle, en incluant les bénéfices environnementaux et sociétaux, un tel système pourrait devenir plus lucratif que son pendant avec l'air comprimé.

Pour que ces systèmes soient déployés à grande échelle, certains défis doivent être surmontés, particulièrement lorsque le stockage est fait dans des réservoirs géologiques : acceptation du public, conséquences en cas de séisme, impacts sur les êtres vivants en cas de fuite de CO₂, entre autres exemples.

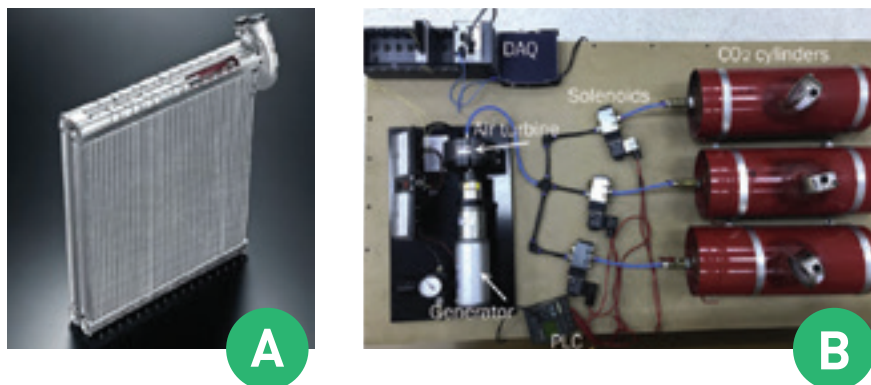


Figure 1. (A) Premier éjecteur transcritique au CO₂ installé dans un pack de conditionnement de Toyota Prius (Lawrence et Elbel, 2014); (B) Dispositif expérimental de stockage d'énergie sous forme de CO₂ comprimé développé par Alami *et al.* (2019).

Conclusions et perspectives

Le dioxyde de carbone est actuellement au centre de l'attention. S'il ne fait plus aucun doute que l'évolution de sa concentration atmosphérique est très préoccupante, les acteurs du monde économique tentent de convertir la menace en opportunité commerciale. Bien que les technologies de captage et de stockage soient maintenant suffisamment matures, le prix du carbone est encore trop bas pour que des modèles d'affaires solides puissent se développer (Hepburn *et al.*, 2019), à moins qu'à l'instar des États-Unis, des incitatifs financiers soient mis en place pour sa séquestration. L'Agence internationale de l'énergie estime que l'usage de cette technologie permettrait de limiter à 2 °C le réchauffement planétaire pour 2100 et que le captage/stockage de CO₂ pourrait contribuer à diminuer de 14 % les émissions de CO₂ d'origine fossile d'ici 2060 (40 % pour l'efficacité énergétique et 35 % pour les énergies renouvelables).

Les systèmes de stockage d'énergie par dioxyde de carbone comprimé offrent une belle opportunité de le valoriser à grande échelle sans avoir ni à le transporter ni à le transformer. Ils permettent en outre une meilleure pénétration des énergies renouvelables en palliant leur caractère intermittent. De plus, en comparaison avec les systèmes à l'air, l'efficacité de cette technologie est accrue. La principale contrainte reste à développer des systèmes de stockage dans un milieu naturel proche du site de captage.

Dans le secteur de la réfrigération, le CO₂ a connu récemment un regain d'intérêt dû au bannissement progressif des HFC par les différents pays occidentaux. Si les quantités nécessaires sont faibles, le nombre d'unités de réfrigération, de conditionnement d'air ou de pompes à chaleur est grand (1,6 milliard de climatiseurs dans le monde en 2017). Les performances thermiques accrues des systèmes au CO₂ transcritique intégrant un éjecteur ou un tube à vortex lui confèrent une forte valeur ajoutée qui a déjà été testée dans un système de conditionnement d'air de voiture.

Finalement, que ce soit pour le stockage d'énergie, la réfrigération ou la géothermie, la principale perspective est de développer des systèmes à l'échelle pilote afin de confirmer ou non les prédictions encourageantes des différents modèles thermo-économiques (Yu *et al.*, 2019).

RÉFÉRENCES

- Alami, A.H., Hawili, A.A., Hassan, R., Al-Hemyari, M. et Aokal, K. (2019).** Experimental study of carbon dioxide as working fluid in a closed-loop compressed gas energy storage system. *Renewable Energy*, 134, 603-611. doi:10.1016/j.renene.2018.11.046
- Dufour, T., Hoang, H.M., Oignet, J., Osswald, V., Fournaison, L. et Delahaye, A. (2019).** Experimental and modelling study of energy efficiency of CO₂ hydrate slurry in a coil heat exchanger, *Applied Energy*, 242, 492-505. doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.009
- Foster, G.L., Royer, D.L. et Lunt, D.J. (2017).** Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. *Nature Communications*, 8 (14845), 1-8. doi: 10.1038/ncomms14845
- Hao, Y., He, Q., Zhou, Q. et Du, D. (2020).** Modeling and techno-economic analysis of a novel trans-critical carbon dioxide energy storage system based on life cycle cost method. *Journal of Energy Storage*, 28 (101273). doi: 10.1016/j.est.2020.101273
- Hepburn, C., Adlen, E., Beddington, J., Carter, E.A., Fuss, S., Mac Dowell, N., Minx, J.C., Smith, P. et Williams, C.K. (2019).** The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal, *Nature*, 575, 87-97. doi: 10.1038/s41586-019-1681-6
- Lawrence, N. et Elbel, S. (2014).** Comparison of CO₂ and R134a two-phase ejector performance for use in automotive air conditioning applications. *SAE Technical Paper*, 2014-01-0689. doi: 10.4271/2014-01-0689
- Liu, Z., Yang, X., Jia, W., Li, H. et Yang, X. (2020).** Justification of CO₂ as the working fluid for a compressed gas energy storage system: A thermodynamic and economic study. *Journal of Energy Storage*, 27 (101132). doi: 10.1016/j.est.2019.101132
- Pearson, A. (2005).** Carbon dioxide—new uses for an old refrigerant. *International Journal of Refrigeration*, 28, 1140-1148. doi:10.1016/j.ijrefrig.2005.09.005
- Yu, B., Yang, J., Wang, D., Shi, J. et Chen, J. (2019).** An updated review of recent advances on modified technologies in transcritical CO₂ refrigeration cycle, *Energy*, 189 (116147). doi: 10.1016/j.energy.2019.116147

