

Relever les défis du transport et du stockage du CO₂

Alors que nous nous efforçons d'améliorer la capture des émissions de CO₂, l'étape suivante de la chaîne de valeur est le transport, qui précède à la fois le stockage et l'utilisation du CO₂.

Historiquement, le CO₂ est transporté par camion en phase liquide, principalement pour la carbonatation des boissons dans le secteur de l'alimentation et des boissons. L'industrie alimentaire et des boissons est un transporteur important, mais les volumes transportés sont faibles et il n'est pas nécessaire de transporter de grandes cargaisons. Le transport à grande échelle du CO₂ par pipelines en phase dense/supercritique gagne du terrain. Il existe des exceptions notables dans certaines régions, telles que l'Amérique du Nord et le Moyen-Orient, où le CO₂ est utilisé pour la récupération assistée du pétrole (RAH) depuis plus de cinq décennies.

En 2024, le Parlement européen a adopté le règlement sur l'absorption et l'agriculture du carbone (CRA), qui a créé le premier cadre volontaire à l'échelle de l'UE pour l'absorption du carbone. Des technologies innovantes sont en cours de mise en œuvre pour le stockage à long terme du CO₂ dans des formations géologiques.

L'un des défis majeurs du transport de CO₂ par pipeline à grande échelle est lié à la diversité des sources de CO₂, qui peuvent contenir des impuretés en fonction de leur origine. En outre, le volume de CO₂ à transporter pose des problèmes logistiques, notamment en ce qui concerne les risques associés à l'exploitation de pipelines à proximité de zones densément peuplées. Les pipelines fonctionnent à haute pression dans la phase dense et des fuites potentielles sont à craindre, bien que des dispositifs de sécurité soient en place.

Le point critique du CO₂ se situe à 30,8°C (87,4°F) et 73,7 bar (1068,89 psi). Au-delà de cette température et de cette pression, il se trouve à l'état supercritique. Le transport du CO₂ dans sa phase supercritique facilite des procédés de transport plus efficaces grâce à une densité accrue. Dans cet état, il remplit tout le tuyau comme un gaz, a une densité plus élevée comme un liquide et

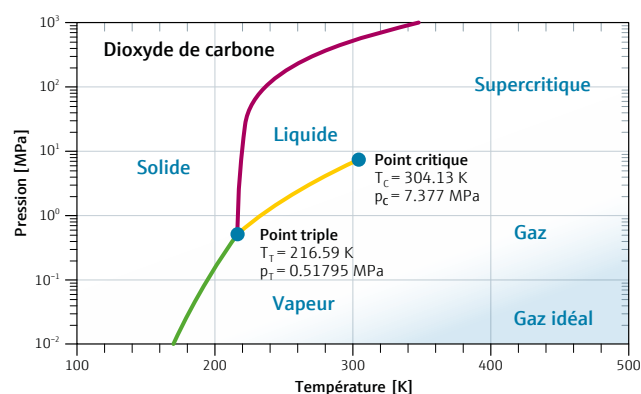


Figure 1 : Différentes phases du dioxyde de carbone

une faible viscosité comme un gaz. Il sera hautement compressible à proximité et au point critique, et les propriétés du fluide changeront très rapidement.

Traiter les impuretés dans le transport et le stockage du CO₂

Les types d'impuretés présentes dans les flux de CO₂ peuvent varier considérablement en fonction de la source. Ces impuretés peuvent réagir chimiquement entre elles et avec leur environnement, formant des sous-produits qui peuvent nuire à la conception, à l'efficacité opérationnelle et potentiellement à l'intégrité du système. L'intégrité des matériaux, qui peut être compromise par la corrosion et la fissuration, est au cœur des préoccupations.

L'humidité (H₂O) est une impureté notable qui peut avoir un impact sur l'intégrité des pipelines, en particulier par la corrosion lorsqu'elle est présente à des concentrations élevées en raison de la formation d'acide carbonique lorsqu'elle réagit avec le CO₂. Par conséquent, il est conseillé de limiter la concentration de l'eau à un maximum de 50 parties par million (ppm). La mesure précise et fiable de l'humidité dans le flux de CO₂ est donc de la plus haute importance. Un système de mesure éprouvé, tel que l'analyseur de gaz par spectroscopie d'absorption laser à diode accordable (TDLAS) J22, offre



Figure 2 : J22 Analyseur de gaz TDLAS pour la mesure de l'humidité

une excellente solution pour renforcer la sécurité et l'intégrité du pipeline.

Il est essentiel d'envisager la possibilité de réactions chimiques entre les différentes impuretés présentes dans le flux de CO_2 , qui peuvent alors conduire à la production de nouveaux composés tels que le soufre élémentaire, l'acide sulfurique (H_2SO_4) et l'acide nitrique (HNO_3). Il est impératif de surveiller attentivement les autres impuretés, notamment le sulfure d'hydrogène (H_2S), l'oxygène (O_2), le méthane (CH_4), l'azote (N_2), le monoxyde de carbone (CO) et l'hydrogène (H_2), en particulier lorsque le CO_2 transporté est issu de sources multiples.

À la fin de la chaîne de valeur du CO_2 , sur le site d'injection et dans le réservoir, il est essentiel de surveiller les impuretés du flux afin d'atténuer les problèmes potentiels tels que les piqûres et les fissures. En outre, la surveillance sert à prévenir les problèmes de stockage géologique liés à la capacité, à l'injectivité et à l'intégrité qui peuvent résulter d'une dissolution accrue des matériaux attribuée aux oxydes de soufre (SO_x), aux oxydes d'azote (NO_x), au sulfure d'hydrogène (H_2S), aux acides carboxyliques, à l'oxygène (O_2) et à l'eau (H_2O), ainsi qu'à la précipitation minérale résultant de ces impuretés.

Il existe différentes technologies de mesure pour analyser des types d'impuretés multiples ou spécifiques dans le CO_2 , mais étant donné que le secteur du captage, de l'utilisation et du stockage du carbone (CCUS) est souvent axé sur les coûts, le faible coût de propriété joue un rôle clé dans le processus de décision en matière de technologie.

Un aspect essentiel de la monétisation du CO_2 est lié à deux facteurs clés : une mesure précise de la quantité et de la qualité avec une attribution et un rapport appropriés. Pour des avantages économiques à long terme, les technologies basées sur le laser, telles que le TDLAS, sont adoptées comme moyen privilégié de réduire le coût total de possession sans compromettre la précision et la fiabilité des mesures.

Mesure de la quantité de dioxyde de carbone

Bien que la mesure du CO_2 en phase dense ou supercritique soit bien établie dans l'industrie, les progrès récents ont mis en évidence la nécessité de techniques de mesure efficaces et de haute précision pour les grands volumes, même dans les procédés de CO_2 impur.

L'industrie a convenu d'utiliser des tonnes métriques comme unité de mesure normalisée pour le CO_2 , définies en millions de tonnes par an (MTPA) pour indiquer les débits. Les quantités de CO_2 capturées par les projets ou les centres peuvent varier de 0,1 MTPA à 20 MTPA. Les exigences réglementaires peuvent varier d'une région géographique à l'autre, ce qui rend la mesure du CO_2 encore plus complexe en ce qui concerne la quantification, la vérification et la déclaration.

Diverses technologies de mesure sont disponibles pour l'évaluation du CO_2 , chacune présentant des défis et des limites spécifiques en fonction de la phase, de la composition et des conditions d'exploitation du CO_2 . Lors du choix d'une technologie de mesure appropriée, il est important de déterminer si la mesure directe de la masse ou la mesure indirecte de la masse est préférable, car la conversion du volume en masse peut nécessiter des dispositifs supplémentaires pour mesurer avec précision la pression, la température et la densité.

Sélection d'une technologie appropriée pour la réduction des émissions de CO_2 et le transport du CO_2

Le transport par gazoduc du dioxyde de carbone (CO_2) en phase dense/supercritique est reconnu comme la méthode la plus rentable pour transporter des quantités importantes de la manière la plus efficace et la plus sûre. Ce mode de transport est avantageux pour plusieurs raisons :

- **Haute densité** : Permet de transporter de plus grands volumes dans un espace restreint
- **Faible viscosité** : Réduit les frottements, facilitant un écoulement plus fluide dans les canalisations
- **Compression efficace** : Le CO_2 supercritique peut être comprimé plus efficacement qu'à l'état gazeux.
- **Réduction de la corrosion** : Généralement, le CO_2 supercritique est déshydraté, ce qui réduit considérablement le risque de corrosion des pipelines.
- **Phase stable** : Le CO_2 supercritique reste stable dans une large gamme de températures et de pressions, ce qui simplifie les opérations.

Dans les pipelines de transport, le CO_2 reste en phase supercritique (la température et la pression sont supérieures à la valeur critique), et la pression est augmentée par l'unité de compression. Contrairement au transport de gaz, le transport supercritique doit être soumis à une pression minimale pour conserver sa phase dense.

Malgré ces avantages, il existe des défis à relever en ce qui concerne les mesures, notamment :

- Impuretés présentes dans la composition du CO₂
- Le choix entre la mesure directe ou indirecte de la masse
- Conditions de fonctionnement à haute pression
- Exigences en matière de maintenance et d'étalonnage

Technologies de mesure du débit pour les émissions de CO₂ en phase dense/supercritique

1. Débitmètre à turbine
2. Débitmètre à cône
3. Tube Venturi
4. Débitmètre à ultrasons
5. Plaque d'orifice
6. Débitmètre à effet Coriolis

Chaque technologie de mesure est caractérisée par des avantages et des inconvénients distincts. Une analyse comparative de ces technologies révèle qu'il n'existe pas de solution intrinsèquement parfaite, comme le montre le tableau 1.

Cependant, le débitmètre à effet Coriolis se distingue par les caractéristiques suivantes :

- Capacité de mesure directe de la masse
- Pas de restriction de montage, pas de longueur droite en amont ou en aval nécessaire
- Possibilité d'étalonnage à l'aide de fluides alternatifs
- Taux d'abattement élevé

Plusieurs groupes de travail industriels en Europe (DNV) et en Amérique (API) travaillent à l'établissement de nouvelles normes pour la mesure du CO₂, le consensus étant que la technologie Coriolis offre la meilleure mesure pour le CO₂ en phase dense/supercritique.

Les systèmes de mesure du CO₂

courante dans l'industrie de l'énergie, car ils offrent des avantages significatifs en garantissant une conception et une installation appropriées des débitmètres et des analyseurs, ce qui permet d'optimiser les performances de ces instruments.



Figure 3 : Débitmètre à effet Coriolis Proline Promass O 300

Dans le contexte du CO₂ dense ou supercritique, qui fonctionne sous haute pression, il est essentiel de prendre en compte des facteurs spécifiques pour garantir un fonctionnement sûr et efficace :

- Compteurs Coriolis haute pression
- Vannes doubles de blocage et de purge à l'entrée et à la sortie des systèmes de mesure
- Buses d'échantillonnage en amont du compteur
- Compteurs de service et d'attente pour la disponibilité des mesures
- Disposition du compteur principal en "Z" pour la vérification de l'étalonnage
- Redondance du calculateur de débit

Lors de la manipulation de CO₂ à haute pression, il est important de donner la priorité à la sécurité. Il s'agit notamment d'envisager des mesures de sécurité telles que des disques de rupture et d'utiliser des diagnostics avancés dans les débitmètres qui peuvent fournir des alertes en cas de problèmes potentiels d'intégrité mécanique.

Il est essentiel de reconnaître l'effet de refroidissement du CO₂ lorsqu'il y a des différences de pression importantes dans le process, car cela peut entraîner des contraintes mécaniques sur le système de tuyauterie. Il est donc conseillé d'incorporer des dispositifs de contrôle de la température redondants et à réponse rapide dans le système de comptage afin d'identifier et de résoudre efficacement le problème.

Tableau 1 : Analyse comparative, avantages et inconvénients des technologies

Technologie	Turbine	Cone	Venturi	USM	Plaque d'orifice	Coriolis
Exigence de densité pour le débit massique	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Rangeabilité	10:1	10:1	10:1	100:1	4:1	100:1
Exigences d'installation en amont et en aval	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Étalonnage avec fluides alternatifs	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
Coût	Moyen	Faible	Faible	Haut	Faible	Haut

Conclusions

Le transport et le stockage du CO₂ jouent un rôle essentiel dans les efforts déployés pour réduire les émissions de carbone et faciliter le captage et le stockage du carbone (CCS). Si l'utilisation de pipelines pour le transport du CO₂ dans sa phase dense ou supercritique offre des avantages significatifs, tels que le déplacement d'un plus grand volume à moindre coût, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne les impuretés et leurs effets sur l'intégrité des pipelines et la précision des mesures.

La présence d'impuretés peut entraîner une dégradation des matériaux et des problèmes opérationnels, d'où la nécessité d'une surveillance attentive. Le choix des technologies appropriées pour la mesure de la composition du CO₂, des impuretés et du débit, telles que les méthodes laser avancées et les débitmètres à effet Coriolis, doit tenir compte du coût, de l'efficacité, de la fiabilité et du coût total de possession.

Compte tenu de l'importance croissante accordée aux projets de CCS à grande échelle, il sera essentiel de relever ces défis techniques et économiques pour garantir un transport et un stockage du CO₂ sûrs, efficaces et rentables.

La tendance émergente dans le transport du CO₂ est le passage à un transport en phase dense, qui offre une plus grande efficacité par rapport aux phases gazeuse et liquide. Cette évolution va de pair avec la croissance rapide des infrastructures de captage et de stockage du carbone, comme le souligne le rapport 2024 du Global CCS Institute. Avec 50 installations opérationnelles, dont trois dédiées au transport et au stockage, et 44 en cours de construction (dont sept dédiées au transport et au stockage), le secteur se développe de manière significative. La réserve de projets CCUS est passée à 628 projets en juillet 2024, ce qui représente une augmentation remarquable de 60 % d'une année sur l'autre, soulignant l'accélération de la dynamique pour atteindre les objectifs mondiaux de décarbonisation (Global CCS institute 2024).

France

Endress+Hauser France
3 rue du Rhin
68330 Huningue
info.fr@endress.com
www.fr.endress.com

Tél. **N°Cristal 09 69 32 24 24**

APPEL NON SURTAXE

Canada

Endress+Hauser Canada
6800 Côte de Liesse
St Laurent, Québec
Tél. (514) 733-0254
Fax (514) 733-2924

Endress+Hauser Canada Ltd
1075 Sutton Drive
Burlington, Ontario
Tél. (905) 681-9292
Fax (905) 681-9444
info.ca@endress.com
www.ca.endress.com

Belgique/Luxembourg

Endress+Hauser Belgium
17-19 Rue Carli
B-1140 Bruxelles
Tél. (02) 248 06 00
Fax (02) 248 05 53
info.be@endress.com
www.be.endress.com

Suisse

Endress+Hauser Suisse
Route de l'Industrie, 58
CH-1030 Bussigny
bussigny.ch@endress.com

Endress+Hauser
(Schweiz) AG
Kägenstrasse 2
CH-4153 Reinach
info.ch@endress.com
www.ch.endress.com

Tél. (41) 61 715 75 75

Endress+Hauser 

People for Process Automation