

Les émissions négatives dans la transition écologique – Cas du stockage géologique du carbone

Audrey Laude-Depezay (*Laboratoire REGARDS, Université de Reims Champagne-Ardenne*), audrey.laude-depezay@univ-reims.fr ; Jonathan Royer-Adnot (*Geogreen*), ira@geogreen.fr

Résumé

Le CCS (Carbon Capture and Storage) consiste à récupérer le CO₂ issu d'une usine puis à le transporter et enfin à le stocker dans un réservoir géologique. Associé avec la production de bioénergies, le CCS pourrait permettre d'obtenir des émissions négatives. L'objectif de cet article est double : d'une part réaliser une revue de la littérature sur le bilan carbone des procédés BECCS (Bioenergy & CCS), d'autre part proposer une innovation technologique qui permettrait d'améliorer leur bilan carbone, à savoir la technologie CO₂-DISSOLVED. L'innovation consiste à injecter le CO₂ dans le réservoir non pas à l'état supercritique, mais sous une forme dissoute dans de la saumure préalablement extraite du réservoir. L'extraction de la saumure permet de récupérer de la chaleur (géothermie) qui peut être réutilisée localement pour les besoins de l'usine, diminuant ainsi ses besoins en énergie fossile et les émissions de CO₂ associées.

Mots-clés : Emissions négatives, bioénergies, capture et stockage du carbone, BECCS, transition écologique, empreinte carbone, CO₂-DISSOLVED

1 - Introduction

Un procédé est dit à « émissions négatives » lorsqu'il économise davantage de CO₂ qu'il n'en émet. Par exemple, la reforestation fixe le CO₂ atmosphérique dans la biomasse, via la photosynthèse. D'autres procédés font l'objet de recherches académiques comme le biocharbon, la minéralisation du carbone ou le captage et le stockage du carbone à partir de bioénergies (BECCS pour BioEnergy with Carbon Capture and Storage). Le principe de cette technologie est de capter le CO₂ émis par des procédés industriels utilisant de la biomasse puis de le stocker définitivement à grande profondeur dans des formations géologiques adaptées. Le BECCS peut être associé à tous types de bioénergies, mais les applications les plus souvent envisagées sont la production de bioéthanol ainsi que la cogénération de chaleur et d'électricité à partir de charbon et de biomasse. Les émissions négatives proviennent du fait que le CO₂ stocké est issu de la biomasse et non pas d'énergie fossile.

Le BECCS fait l'objet d'un intérêt croissant de la part de la communauté scientifique. Il est d'ailleurs intégré par le GIEC dans les modèles d'évolution du parc énergétique mondial d'ici 2100. Cette technologie clé, serait ainsi quasiment incontournable pour atteindre la cible d'une limitation à 2°C de la hausse des températures. En tant que procédé à émissions négatives, le BECCS pourrait avoir une action corrective et non pas seulement préventive sur le climat : Le procédé agit comme une pompe à carbone. Il permet ainsi - selon la stratégie adoptée - soit de donner davantage de souplesse et de temps aux acteurs pour s'organiser, soit de viser des objectifs climatiques plus contraignants, soit de limiter les actions de réductions d'émissions à court terme. Pour autant, le potentiel des émissions négatives via le BECCS est encore très incertain (Van Vuuren et al., 2013).

Diverses barrières au développement du BECCS peuvent être formulées, telles que le coût, le nombre insuffisant de pilotes industriels, l'acceptabilité sociale ou l'impact sur la biodiversité (Fuss et al. , 2014). Mais établir la preuve de l'existence des émissions négatives ou au moins de réductions drastiques d'émission semble un préliminaire indispensable. Par conséquent, il serait souhaitable que différentes variantes soient testées pour établir les conditions d'obtention des émissions négatives. Dans le cas de la production de bioéthanol à partir de betteraves, les émissions négatives étaient possibles mais au prix d'une augmentation très élevée de la consommation d'énergie et à un coût très élevé (Laude et al., 2011). Une possibilité d'amélioration de ce rapport coût/bénéfice pourrait être offerte par l'approche proposée dans le projet CO₂-DISSOLVED, cofinancé par l'ANR, qui consiste à associer au procédé BECCS la géothermie pour récupérer de la chaleur à destination de l'usine émettrice. L'objectif de cet article est – d'une part - de procéder à une courte revue de littérature sur les empreintes carbone réalisées sur le BECCS et – d'autre part- d'évaluer les bénéfices de l'approche CO₂-DISSOLVED, dans le cas particulier de la production de bioéthanol.

La section 2 de cet article est une revue de littérature concernant les différents procédés BECCS et les évaluations de l'empreinte carbone précédemment réalisées. La section 3 détaille deux procédés, à savoir le CCS « classique » (injection et stockage en aquifère de CO₂ supercritique) appliqué à une usine de production de bioéthanol à partir de betteraves sucrières et le nouveau procédé « CO₂-DISSOLVED » qui combine stockage du carbone et géothermie.

2 – L'empreinte carbone des technologies BECCS

2.1 Enjeux de l'empreinte carbone du CCS fossile

Le type de CCS le plus étudié est la production d'électricité à partir de charbon ou de gaz naturel. 85% des études portant sur l'analyse du cycle de vie du CCS concernent la technologie de post-combustion avec utilisation de monoéthanolamine (MEA) comme solvant, (Corsten et al. 2013).

Même en cantonnant à une seule technologie, les études sont difficiles à comparer car les unités fonctionnelles ne sont pas toujours les mêmes. De même les limites du système ne sont pas forcément identiques. Par exemple, parfois seule l'étape de captage est prise en compte. En effet, les étapes de transport et de stockage peuvent varier largement d'un projet à un autre. Le site de stockage peut être distant de quelques kilomètres jusqu'à 500 kilomètres et les caractéristiques géologiques dont dépendent les propriétés d'injection sont également très variables. Le stockage pose aussi la question des fuites éventuelles du CO₂ injecté dans le réservoir à la fois dans des couches géologiques adjacentes ou supérieures au site, bien que ce risque paraisse limité puisque le stockage du CO₂ est une activité encadrée sur le plan législatif (voir directive européenne).

2.2 Spécificités du BECCS

2.2.1 – Transformation de la biomasse en énergie

Il existe trois familles de techniques privilégiées pour convertir la biomasse en énergie, (Rhodes, 2007). La première est la transformation biologique, notamment la fermentation qui utilise des microorganismes pour obtenir du bioéthanol. La seconde famille est la gazéification. Ce terme désigne un ensemble de procédés thermiques qui produisent des gaz combustibles, mais aussi des produits de carbonisation (dont du goudron) et/ou de la poussière. Les gaz combustibles vont être utilisés a posteriori pour produire de l'énergie. La composition précise de ces gaz dépend d'un grand nombre de facteurs comme la biomasse utilisée, la température ou l'agent gazéifiant (Carbo et al.

2011). La troisième famille correspond à la combustion de la biomasse qui permettra de produire de l'électricité et de la chaleur.

Des chaînes CCS peuvent être installées au niveau de chacun des flux carbonés produits par les procédés présentés ci-dessus, d'où une pluralité de procédés BECCS, ayant des coûts, des bilans carbone et des rendements énergétiques différents. Ajoutons qu'une autre production possible est la pâte à papier. En effet, sa production engendre un coproduit, la liqueur noire, qui peut être transformée afin de produire des biocarburants ou de la chaleur et de l'électricité.

Les secteurs les plus prometteurs à moyen terme semblent être : la production de bioéthanol, la production d'électricité via la combustion combinée de biomasse et de charbon, ainsi que la production de pâte à papier. Dans le premier cas, l'avantage déterminant est provoqué par l'absence d'étape de capture compte tenu du fait que les fumées émises sont quasiment pures en CO₂. Elle pourrait être d'ores et déjà rentable lorsque la chaîne BECCS est associée à la récupération de pétrole. La production d'électricité à partir de biomasse uniquement nécessite des investissements lourds et une quantité de biomasse très importante. La combustion combinée avec le charbon permettrait d'obtenir des émissions faiblement négatives, mais à un coût plus bas. Le cas de la pâte à papier pourrait se révéler particulièrement intéressant pour les principaux producteurs de papier actuels comme la Suède, la Finlande et le Canada, mais aussi pour les grands producteurs en devenir comme l'Inde ou la Chine. De plus, ces usines sont souvent de grande taille, ce qui permettrait des effets d'échelle importants.

2.2.2 – Bilan carbone des procédés BECCS

Il existe un nombre très limité de mesures d'empreintes carbone relatives aux procédés BECCS, alors que le bilan carbone lié à l'ajout d'une chaîne BECCS devrait varier considérablement selon le secteur d'activité et le procédé de capture étudié. De plus, les technologies permettant la production d'hydrogène ou la gazéification sont encore largement immatures, ce qui rend leurs estimations encore plus incertaines. Nous réduisons ici cette courte revue de littérature au cas du bioéthanol, de l'électricité et de la pâte à papier.

a - La production de bioéthanol

La biomasse utilisée aujourd'hui pour la production de bioéthanol provient de cultures alimentaires comme la canne à sucre, la betterave sucrière (toutes deux riches en sucre) ou à partir de blé, de maïs et d'orge (riches en amidon). La conversion de la biomasse en bioéthanol nécessite une étape de fermentation. Le flux de CO₂ est en théorie pur et peut donc être capté à moindre coût puisque une simple déshydratation sera requise pour récupérer le carbone. Cependant, la conversion de la biomasse nécessite une quantité conséquente d'énergie. Si cette dernière est d'origine fossile, la récupération du CO₂ issu de la chaudière alimentant l'installation sera indispensable pour obtenir des émissions négatives. La production de biocarburants de seconde génération est réalisée à partir de plantes à forte teneur ligno-cellulosique (comme le bois, la paille, le miscanthus, etc.) qui doivent être hydrolysées avant la fermentation.

Möllersten et al.(2003) se basent sur une production d'environ un million de litres par jour à partir de canne à sucre, sachant que 0,45 Mt CO₂ seraient alors séquestrées chaque année. Lindfeldt et Westermarck (2008) opèrent un changement de perspective : ces auteurs comptent les émissions de carbone par térajoule (TJ) de biomasse produite et non plus par tonne d'éthanol à partir de maïs, blé,

ressources ligno-cellulosiques. Pour chacune de ces biomasses, ils estiment que la séquestration du carbone réduit les émissions d'environ 31 t CO₂ pour l'équivalent de 1GJ de pétrole produit. Les effets de substitution par rapport au pétrole sont supposés être de 89 t CO₂ (toujours pour un GJ de pétrole) pour les ressources ligno-cellulosique, 0,6 t CO₂ pour le maïs et 9 t CO₂ pour le blé.

b- La production d'électricité

L'électricité peut être produite à partir de charbon et de biomasse. Pour une quantité de biomasse de 10 à 20% de l'énergie thermique entrante, il existe des émissions négatives à hauteur respectivement de -1573,1 g/kWh et -1754,6g/MWh (IEA, GHG, 2009). Les principaux défis à relever concernant la cogénération sont liés aux différences de propriétés entre les différents carburants utilisés (pouvoir calorifiques, humidité, composés volatils, etc.).

Une autre technique de production d'électricité repose sur la gazéification de la biomasse dans des centrales électriques dites à cycle combiné avec gazéification intégrée (Integrated Gasification Combined Cycle). Ce type de centrale utilise deux turbines : les gaz issus de la combustion actionnent une première turbine, à la sortie de celle-ci les gaz sont suffisamment chauds pour changer l'eau froide en vapeur, qui actionnera la deuxième turbine. Ce système récent augmente l'efficacité thermique de l'installation. D'après Carpentieri et al. (2005) le résultat de leur empreinte carbone devient effectivement négatif : -0,165 kg CO_{2eq}/MJ. L'étude prend en compte les émissions dues à la construction, à l'exploitation et au démantèlement de la centrale, celles dues à la production de la biomasse et à la conversion d'énergie. Elle prévoit également un cycle de rotation des cultures sur sept ans.

c – Production de pâte à papier

Une autre voie prometteuse est celle de l'industrie papetière. Certaines fabriques ne produisent que de la pâte à papier et la revendent à des usines qui fabriquent le papier, tandis que d'autres ont un fonctionnement intégré. Le traitement du bois conduit à l'obtention d'un coproduit appelé liqueur noire qui représente un peu plus de la moitié de la biomasse utilisée. La liqueur noire est généralement brûlée au sein de chaudières de récupération afin de produire de la chaleur et de l'électricité par cogénération, mais elle pourrait aussi être transformée en biocarburant. Möllersten et al. (2003) préconisent une approche complètement intégrée de l'usine pour réduire la pénalité énergétique qu'impose l'ajout du CCS et diminuer son coût. La demande pourra être satisfaite soit par la combustion de fioul, de gaz naturel ou de biocarburant, soit en récupérant une partie de la vapeur émise pendant la production de la pâte. Möllersten et al. (2006) étudient les conséquences d'une chaîne BCCS dans le cas d'une usine de pâte Kraft et dans le cas d'une usine intégrée. Les deux usines ont la même capacité de production finale de papier de 1,2t de papier par jour correspondant à 1500 t/j de biomasse sèche (BS) et une production électrique de 2,5 et 4,8 GJ/t BS (tonne de biomasse sèche) respectivement. L'efficacité énergétique de l'usine de pâte à papier est inférieure. Ces auteurs estiment que les émissions directes sont de -1,51 t CO₂/t BS pour la fabrique de pâte à papier et de -2,15 tCO₂/t BS pour l'usine intégrée. Les émissions indirectes sont respectivement de 0,45 t CO₂/t BS dans le premier cas et varient entre -0,04 et 0,05 t CO₂/tBS dans le second, par rapport aux mêmes systèmes sans CCS avec l'électricité supplémentaire produite par une centrale à charbon. Les résultats sont respectivement de -1,06 t CO₂/t BS et -1,82 t CO₂/t BS si l'électricité est produite par la biomasse. Une modélisation quelque peu différente est proposée par Hektor et Berntsson (2007). Ils reprennent le même type d'usine mais la vapeur issue du procédé de production de la pâte à papier est récupérée pour régénérer l'absorbant et ainsi limiter les apports

énergétiques dus au CCS. Les auteurs proposent deux alternatives, variant par la pression de la vapeur (basse et moyenne pression). Dans le premier cas, la réduction de carburant à utiliser est de 56% et dans le second de 81%.

3 – L’apport de CO₂-DISSOLVED : application à la production de bioéthanol

Ici nous appellerons « CCS supercritique » la technologie CCS qui consiste à enfouir le dioxyde de carbone à l’état supercritique et « CO₂-DISSOLVED» la technologie CCS avec enfouissement de dioxyde de carbone par dissolution dans la saumure de l’aquifère salin qui constitue le site de stockage.

3.1 Description de l’usine et cas du CCS supercritique

L’usine qui a servi de référence est une sucrerie-distillerie située en France (en Région Centre). Elle produit à la fois du sucre et du bioéthanol à partir de betteraves sucrières, mais l’étude est réduite à la partie bioéthanol. La production de ce dernier nécessite une étape de fermentation des betteraves qui produit un flux de CO₂ quasiment pur: la présence de vapeur d’eau est éliminée par déshydratation et les composés organiques volatils sont présents en très petites quantités, ce qui a été vérifié par des mesures in situ.

Les émissions issues de la fermentation pourraient être récupérées et stockées, pour un total de 45 000 t CO₂/an. L’ensemble de l’usine est alimenté en énergie par une chaudière au gaz naturel qui émet 60 500 tCO₂/an. Une autre caractéristique importante de la production de bioéthanol est qu’elle n’est pas continue sur l’année. La récolte des betteraves s’effectue généralement en octobre et en novembre, ce qui implique un pic d’activité entre octobre et décembre. Les émissions sont alors près de quatre fois plus importantes en décembre qu’en janvier. Les installations CCS devront donc, si possible, être dimensionnées en fonction de ce pic d’activité. Sur le plan de l’empreinte carbone, il serait favorable de stocker toute les émissions. Pourtant, l’analyse économique pourrait mener à un optimum entre un dimensionnement permettant de capturer l’ensemble des émissions et le pic d’activité (plus onéreux) et un dimensionnement seulement adapté aux émissions de base ne permettant pas de capturer l’ensemble des émissions du pic d’activité.

L’usine d’Artenay sans CCS (qu’il soit avec CO₂ supercritique ou dissous) sert de point de référence pour mesurer les émissions évitées. La principale source d’émissions d’origine fossile provient de la chaudière au gaz naturel. L’efficacité énergétique de cette chaudière aura donc un impact non négligeable sur l’empreinte carbone de l’usine sans CCS, mais aussi avec CCS. Plus la référence est mauvaise en termes d’émissions, plus la quantité d’émissions économisées sera grande et l’impact du CCS apparaître d’autant plus bénéfique pour l’environnement. A ce titre, il est important de constater que la chaudière employée est moins efficace que celles existantes en moyenne sur le marché. Afin de discuter de cet effet, plusieurs scénarios pourraient être retenus, l’un représentant la véritable chaudière actuelle, une autre représentant une chaudière d’efficacité moyenne sur le marché et, enfin, un troisième prenant en compte une chaudière d’une très grande efficacité énergétique. Cela permettrait aussi de tenir compte de l’évolution probable dans le temps de l’efficacité des chaudières au gaz naturel d’ici à 2020. Supposons que les scénarios retenus soient les suivants : Le scénario « basse efficacité » correspond à une consommation égale à la chaudière actuelle. Pour le scénario « moyenne efficacité », la consommation de la chaudière serait de 70% de celle existante et pour le scénario « haute efficacité », la consommation ne serait plus que de 50%. La

consommation annuelle de gaz naturel dans le scénario bas est de 444 GWh/an, de 333 GWh/an pour le scénario moyen et de 222 GWh/an pour le scénario avec haute efficacité, les pics de consommation du mois de décembre atteignent respectivement 124 GWh, 93 GWh et 62 GWh. Les émissions associées seraient respectivement de 60 500 tCO₂/an, 45 375 tCO₂/an et 30 250 tCO₂/an.

Les émissions issues de la fermentation restent toujours de 45 000 tCO₂/an. L'empreinte carbone réalisée pour le cas « CCS supercritique » montre que la réduction des émissions est de 62% par hectolitre d'éthanol produit (Laude et al., 2011). Si les émissions des deux sources étaient captées et avec un scénario de basse efficacité de la chaudière, la réduction des émissions serait de 106%, ce qui signifie que les émissions négatives pourraient être atteintes. Néanmoins, la séparation du CO₂ des autres gaz entraîne une surconsommation d'énergie élevée et est également très coûteuse (Laude et al., 2011).

3.2- Caractéristiques du concept CO₂- DISSOLVED

3.2.1 – Fonctionnement

Sur le plan technique, la principale crainte liée à l'approche classique du CCS réside dans de possibles fuites de CO₂ supercritique vers les couches géologiques situées au-dessus du réservoir, sous l'effet de la pression du gaz injecté et de sa densité moindre par rapport à la saumure en place dans l'aquifère. Par ailleurs, l'impact en pression au sein du réservoir est susceptible de se répercuter loin de la zone d'injection et ce, d'autant plus que les quantités de CO₂ injectées sont importantes. Ce phénomène pourrait limiter l'implantation de projets voisins utilisant les mêmes couches géologiques.

Dans l'approche proposée pour CO₂-DISSOLVED, l'absence de phase gazeuse ou supercritique, moins dense que la saumure, n'induit plus aucun risque de remontée du CO₂ vers les couches géologiques supérieures (au contraire, la saumure enrichie en CO₂ qui est réinjectée est légèrement plus dense que la saumure extraite). Du fait que prélèvement et injection de saumure s'effectue à bilan de masse nul, l'impact en pression restera limité à proximité immédiate des puits de production et d'injection, sans influence notable à l'échelle du réservoir. Une description de CO₂-DISSOLVED est donnée à la figure 1 pour un cas général, non spécifiquement liée à l'usine d'Artenay étudiée ici.

Le moindre impact sur le réservoir n'est pas le seul bénéfice de la technologie CO₂-DISSOLVED. Le bilan énergétique peut être amélioré par le recours à la géothermie dite de basse enthalpie, c'est-à-dire la production de chaleur par extraction d'une eau généralement située, dans le bassin de Paris, entre 1500 et 2500m de profondeur et à moins de 90°C. Dans le cas d'Artenay, la saumure extraite atteindrait une température estimée entre 60 et 80°C et l'aquifère (nommé Dogger) se situe à une profondeur d'environ 1600 à 1800m. La chaleur se transportant mal, une utilisation locale est à privilégier et dans notre cas, ce sont les besoins énergétiques de l'usine qui sont visés.

Le système nécessite le forage de deux puits : le puits d'injection de la saumure et le puits de production de la saumure. C'est ce qu'on appelle un doublet géothermique. L'écartement entre les deux puits au niveau du réservoir est un facteur prépondérant dans la durée de vie du système, car peu-à-peu la réinjection de la saumure refroidit le réservoir. De plus, le CO₂ dissous va finir par atteindre le puits de production et la saumure extraite contiendra une concentration du CO₂ croissante au cours du temps, rendant ainsi le stockage moins efficace. Pour autant, il n'y aura pas de relargage du CO₂ dans l'atmosphère car la saumure circule dans une boucle fermée entre les deux puits. La récupération de la chaleur se fait grâce à un échangeur situé en surface entre les deux têtes

de puits. Une description plus complète est disponible dans Kervévan et al. (2014). La Figure 2 schématise l'intégration de de l'approche CO₂-DISSOLVED dans la chaîne de production du bioéthanol.

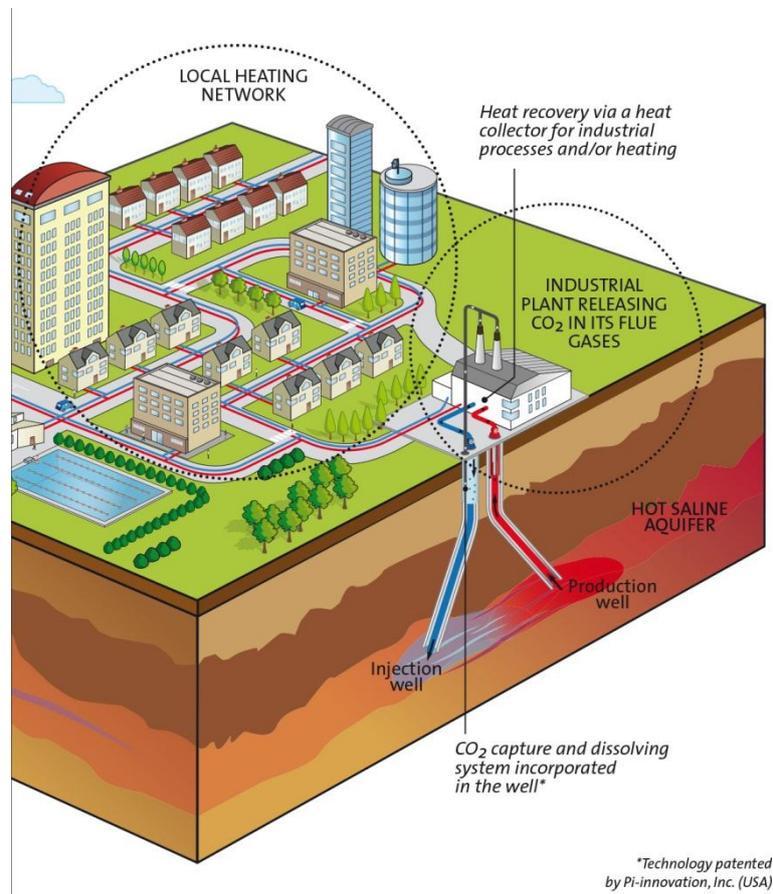


Figure 1: Représentation schématique du concept CO₂-DISSOLVED, d'après Kervevan et al (2014)

Supposons que seules les émissions issues de la fermentation soient récupérées, car il n'est pas nécessaire d'avoir une étape de séparation des gaz. Les étapes à inclure dans l'étude sont d'une part celles liées à la production de bioéthanol sur le site (production d'énergie par la chaudière au gaz naturel et étape de fermentation), d'autre part celles liées au CCS. Dans le cas du CCS supercritique, il s'agit d'évaluer l'impact de la compression, du transport et du stockage. Il n'y a pas d'étape de séparation des gaz car le flux sortant est quasiment pur. Dans le cas du CCS par la technologie CO₂-DISSOLVED, l'analyse comprend l'étape de dissolution du CO₂ via un bulleur installé dans le puits d'injection, l'échangeur de chaleur, les deux puits d'injection et de production (doublet géothermique). Pour les deux types de CCS, le monitoring, la construction ainsi que les opérations de production et de maintenance doivent être inclus. A l'inverse, les étapes en amont de l'usine (production de betteraves et leur acheminement au site) et en aval (distribution du bioéthanol et sa consommation) ne sont pas considérées dans cette étude.

3.2.2 –Enjeux spécifiques de CO₂-DISSOLVED vis-à-vis de l'empreinte carbone

Le premier enjeu concerne la quantité d'énergie qui peut être effectivement récupérée par géothermie. Cette capacité de récupération d'énergie dépend des caractéristiques géologiques de

l'aquifère salin. Dans le cas présent, l'aquifère salin concerné est le Dogger mais le taux de récupération effective de l'énergie par l'usine sera nécessairement inférieur (Pour autant la production est toujours inférieure aux besoins de l'usine, même en basse saison : toute l'énergie produite peut donc être utilisée). La chaleur produite est utilisée pour préchauffer l'eau et réduire ainsi la consommation de gaz naturel. Mais il est important de noter que cette énergie compense indirectement la surconsommation énergétique induite par le CCS. Cette pénalité énergétique est habituellement l'une des critiques les plus vives associées au CCS « supercritique » car l'accroissement de la demande en énergie fossile augmente la dépendance du système énergétique global envers ces dernières. Dans le cas général avec séparation des gaz (quand la concentration de CO₂ dans les fumées est faible), cette surconsommation est principalement due au procédé de captage du CO₂ dans les fumées ainsi qu'à l'énergie requise pour la compression et le pompage du CO₂ nécessaire à son transport et à son injection. Dans le cas du stockage sur la fermentation, cette surconsommation est principalement due à la compression du gaz nécessaire pour le transport et l'injection.

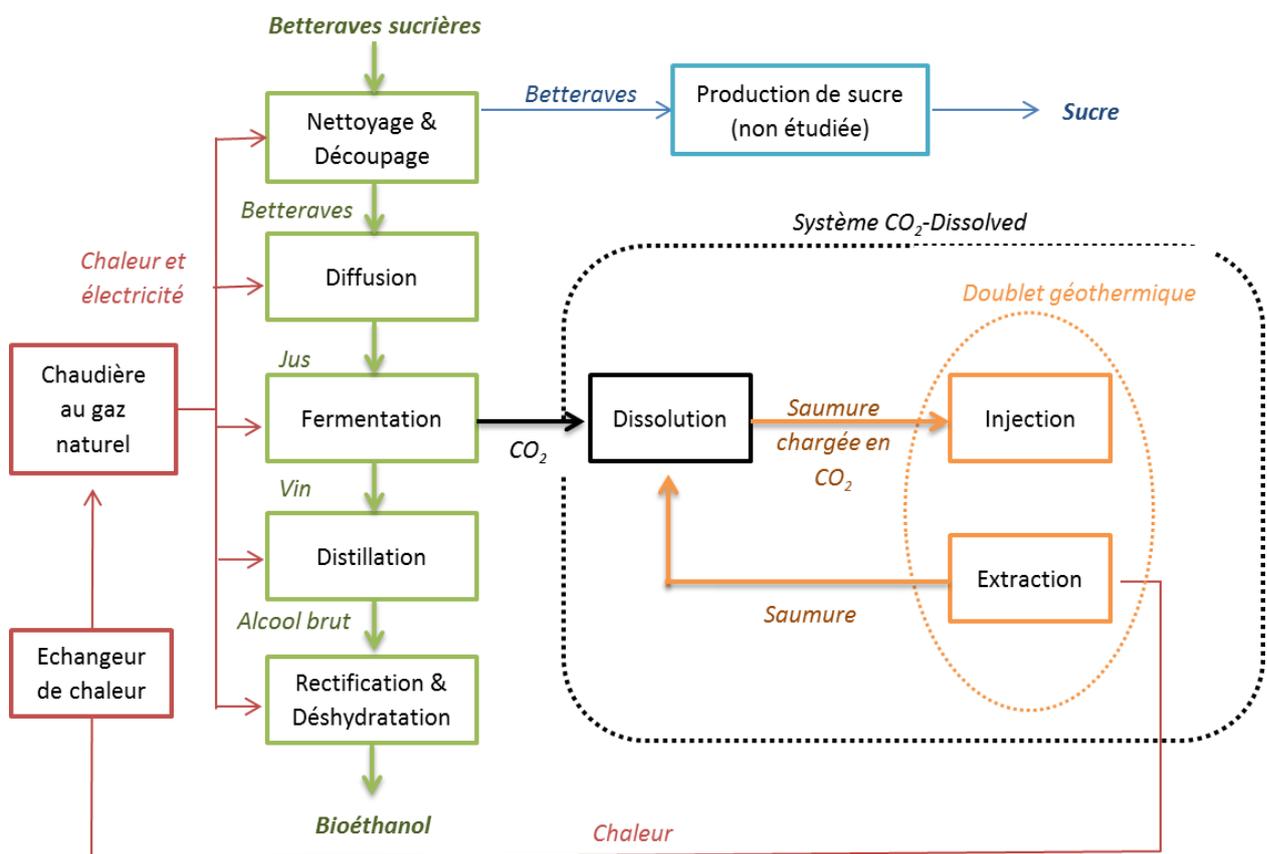


Figure 2: Schéma simplifié de l'intégration de CO₂-DISSOLVED dans une usine de production de bioéthanol

Le deuxième enjeu concerne l'efficacité du stockage qui est une donnée essentielle du CCS, c'est-à-dire sa capacité à retenir définitivement le CO₂ dans le réservoir (soit sous forme dissoute dans la saumure, soit sous forme minérale si les réactions chimiques avec la matrice poreuse ont permis de déclencher la précipitation de phases minérales carbonatées). Rappelons que dans le procédé « CO₂-DISSOLVED », le stockage du CO₂ se fait après dissolution préalable dans la saumure extraite de l'aquifère. Ainsi le CO₂, une fois dissous, restera dans la boucle géothermique et n'est pas réémis. Le troisième enjeu consiste à trouver un site de stockage compatible avec la production géothermale et

situé à proximité immédiate de l'émetteur ou d'un autre utilisateur potentiel de la chaleur produite. Ainsi, les coûts induits par le transport du CO₂ jusqu'à son site de stockage seront nuls et la récupération de chaleur sera optimale.

Par ailleurs, une quantité limitée de CO₂ peut être dissoute dans un volume de saumure donné. Le troisième enjeu est donc l'appariement entre un émetteur compatible, c'est-à-dire : suffisamment grand pour que le maximum de CO₂ soit stocké, mais aussi suffisamment petit pour que la quantité de CO₂ émis soit compatible avec les capacités physique de dissolution du CO₂ dans la saumure. S'il y a trop d'émissions, ces dernières ne pourront être totalement dissoutes dans la saumure et le reliquat devra donc être relâché dans l'atmosphère. La technologie CO₂-DISSOLVED est donc adaptée pour de relativement petits émetteurs (de l'ordre de 100 000 t CO₂/an), mais pas – a contrario – aux très grands émetteurs tels que les centrales électriques au charbon. Cependant, la majorité des installations transformant de la biomasse correspondent à la catégorie des petits et moyens émetteurs. Ainsi CO₂-DISSOLVED est davantage un complément qu'une alternative à l'approche CCS supercritique dans la mesure où cette dernière est a priori moins contrainte par les capacités d'injection. Dans le cas de l'usine d'Artenay, le pic d'activité en fin d'année pourrait mener à une production de CO₂ momentanément supérieure aux capacités de dissolution dans la saumure, ce qui reste toutefois à vérifier par des calculs plus précis qui seront menés ultérieurement dans le cadre du projet CO₂-DISSOLVED.

La version présentée ici de CO₂-DISSOLVED devrait permettre une restriction drastique des émissions directes (par fermentation) et indirecte (moins d'énergie fossile utilisée par la chaudière). Pour autant, au global, l'obtention d'émissions négatives reste assez peu probable, puisque qu'à priori la géothermie ne compenserait pas l'ensemble des besoins en énergie. L'obtention d'émissions négatives passerait par deux solutions possibles : soit le remplacement de la chaudière au gaz par une chaudière utilisant de la biomasse, soit par une étape de séparation des gaz issus de la chaudière, avant leur stockage géologique. Cette dernière option est actuellement à l'étude dans le cadre du projet CO₂-DISSOLVED et s'avèrerait a priori viable techniquement en intégrant la nouvelle technologie brevetée « Pi-CO₂ », propriété de Partnering in Innovation, inc. Cette approche nécessiterait de creuser un troisième puits de gros diamètre dédié à la séparation du CO₂ des fumées par dissolution dans un flux de saumure (cf. Kervévan et al., 2014). Cette technologie pourrait constituer une alternative intéressante aux systèmes de capture actuels qui font appels à des solvants comme la monoethanolamine (MEA) et qui s'avèrent fortement consommateurs d'énergie.

Conclusion

L'obtention d'émissions négatives par les technologies BECCS est possible. Cependant la preuve doit en être apportée pour chaque type de production (électricité, bioéthanol, papier...), selon les divers procédés de fabrication et idéalement selon les différents types de biomasses disponibles. Par exemple, l'empreinte carbone du BECCS pour la betterave sucrière ou la canne à sucre ne sera pas la même, sans compter les risques de déforestation et de changement d'affectation des terres. Cette diversité est loin d'être entièrement couverte par la littérature. De plus, même dans le cas du CCS supercritique sur des usines produisant de l'électricité à partir de charbon ou de gaz (cas les plus traités), les analyses de cycle de vie sont loin d'être toujours comparables. L'une des raisons tient aux caractéristiques spécifiques de l'appariement entre site émetteur et site de stockage, telle que la composition des gaz émis, la technologie de capture, la distance entre sites ou les propriétés géologiques du réservoir visé.

La proposition ici d'une nouvelle technologie, CO₂-DISSOLVED, apporte encore une nouvelle facette à cette diversité de procédés CCS et aux empreintes carbone associées. Néanmoins, elle possède deux spécificités intéressantes. Premièrement, elle est particulièrement adaptée aux petits émetteurs de CO₂, comme le sont souvent les productions de bioénergies. Deuxièmement, la récupération d'énergie par géothermie permet de compenser le surcroît d'énergie dû au fonctionnement du CCS et d'alimenter l'usine en chaleur.

Cette étude est encore très parcellaire. Elle n'a eu pour objet que de présenter les principaux enjeux liés à l'utilisation de la technologie CO₂-DISSOLVED dans le cas de son application sur une usine de production de bioéthanol. Une analyse plus approfondie, prévue dans le cadre du projet CO₂-DISSOLVED, nous permettra d'en chiffrer les impacts et ainsi corroborer les hypothèses émises quant aux empreintes carbone et énergie.

Remerciements

Ce travail bénéficie du soutien de l'ANR (l'Agence Nationale de la Recherche) dans le cadre du projet CO₂-DISSOLVED, coordonné par le BRGM. Les auteurs remercient en particulier Christophe Kervévan (BRGM) pour sa relecture et ses conseils.

Bibliographie

- Carbo, Michiel C., Ruben Smit, Bram van der Drift, and Daniel Jansen. 2011. "Bio Energy with CCS (BECCS): Large Potential for BioSNG at Low CO₂ Avoidance Cost." *Energy Procedia* 4 (January): 2950–54.
- Carpentieri, Matteo, Andrea Corti, and Lidia Lombardi. 2005. "Life Cycle Assessment (LCA) of an Integrated Biomass Gasification Combined Cycle (IBGCC) with CO₂ Removal." *Energy Conversion and Management* 46: 1790–1808.
- Corsten, Mariëlle, Andrea Ramírez, Li Shen, Joris Koornneef, and André Faaij. 2013. "Environmental Impact Assessment of CCS Chains – Lessons Learned and Limitations from LCA Literature." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 13 (March).
- Fuss, S., Canadell, J.G., Peters, G.P., Tavoni, M., Andrew, R. M., Ciais, P., Jackson, R.B., Jones, C.D., Kraxner, F., Nakicenovic, N., Le Quéré, C., Raupach, M.R., Sharifi, A., Smith, P., Yamagata, Y. 2014. "Betting on negative emissions." *Nature Climate Change*. 4 (10): 850-853.
- Hektor, Erik, and Thore Berntsson. 2007. "Future CO₂ Removal from Pulp Mills – Process Integration Consequences." *Energy Conversion and Management* 48 (11): 3025–33.
- IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEA GHG). 2009. "Biomass CCS Study." 2009-9.
- Kervévan, C, M Beddelem, and K O Neil. 2014. "CO₂ -DISSOLVED : A Novel Concept Coupling Geological Storage of Dissolved CO₂ and Geothermal Heat Recovery – Part 1 : Assessment of the Integration of an Innovative Low-Cost , Water- Based CO₂ Capture Technology." *Energy Procedia* (in press).
- Laude, A., O. Ricci, G. Bureau, J. Royer-Adnot, and A. Fabbri. 2011. "CO₂ Capture and Storage from a Bioethanol Plant: Carbon and Energy Footprint and Economic Assessment." *International Journal of Greenhouse Gas Control* 5 (5): 1220–31..
- Lindfeldt, Erik G., and Mats O. Westermark. 2008. "System Study of Carbon Dioxide (CO₂) Capture in Bio-Based Motor Fuel Production." *Energy* 33 (2): 352–61.
- Möllersten, Kenneth, Lin Gao, and Jinyue Yan. 2006. "CO₂ Capture in Pulp and Paper Mills: CO₂ Balances and Preliminary Cost Assessment." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11 (5-6): 1129–50.
- Möllersten, Kenneth, Jinyue Yan, and Jose Moreira. 2003. "Potential Market Niches for Biomass Energy with CO₂ Capture and storage—Opportunities for Energy Supply with Negative CO₂ Emissions." *Biomass and Bioenergy* 25 (3): 273–85.
- Rhodes, James S. 2007. "Carbon Mitigation with Biomass : An Engineering, Economic and Policy Assessment of Opportunities and Implications." Carnegie Mellon University.
- Van Vuuren, D.P., Deetman, S., van Vliet, J., Berg, M., van Ruijven, B.J., Koelbl, B. 2013. "The role of negative CO₂ emissions for reaching 2 °C—insights from integrated assessment modeling." *Climatic Change* 118, 15-27.