Stockage géologique de carbone issu des bioénergies

Une nouvelle forme de bioéconomie ?

Audrey Laude
URCA, CRIEG, REGARDS

DOI : https ://doi.org/10.17184/eac.8909

Résumé : Le BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage) permet de récupérer les émissions de CO_2 issues de bioraffineries pour le stocker définitivement dans des formations géologiques. Le BECCS est considéré comme incontournable dans les modèles du GIEC pour limiter la hausse des températures mais son déploiement est très lent. Outre le manque d'incitations économiques adéquates, cet article démontre que cette technologie a été conçue dans une perspective top-down, sans prendre en compte les caractéristiques locales ni les effets de concurrence avec les autres technologies de décarbonation. Pour cela une analyse des discours sur le BECCS dans la littérature scientifique est réalisée puis comparés aux difficultés rencontrées par les acteurs du projet CO2-DISSOLVED cherchant à construire un pilote industriel.

Mots-clés : Stockage géologique du carbone, bioénergies, BECCS, pilote industriel

Introduction

Même si nous arrêtions d'émettre des gaz à effets de serre, le CO_2 présent dans l'atmosphère continuerait de réchauffer la planète. Aussi, à côté des technologies visant à réduire les émissions (ex. les énergies renouvelables), d'autres sont développées pour retirer le CO_2 déjà présent dans l'atmosphère, comme la reforestation. Le BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage) fait partie de cette famille de solutions. Il vise à récupérer le CO_2 émis par une usine de bioénergie (ex. électricité, chaleur, agrocarburants) pour ensuite l'enfouir dans des formations géologiques profondes (ex. aquifères salins, anciens sites de gaz naturels).

Les modèles du GIEC font appel au BECCS pour limiter la hausse des températures dans les scénarios contraignants (hausse inférieure à 2° C), voir IPCC (2022). Pour autant, cette technologie est très controversée. Un développement massif est envisagé,

avec 199 millions d'hectares impactés pour une cible de 1,5° C en 2050. Si massif, qu'il interroge sur ses effets possibles sur la biodiversité et la compétition avec les usages alimentaires. Il existe une autre menace, plus insidieuse. Le BECCS (et les autres technologies de stockage) est conçu par le GIEC comme complémentaire aux autres mesures d'atténuation. Mais son existence pourrait servir d'argument pour les retarder en arguant que les GES pourront être retirer de l'atmosphère ultérieurement. Une posture tentante, puisqu'elle évite de remettre en cause nos modes de production et de consommation.

Toutefois, c'est sur un autre point que cet article entend donner un éclairage nouveau : les difficultés de mise en œuvre d'une filière BECCS. Au niveau mondial, il n'existe que cinq pilotes de cette technologie, ce qui laisse craindre que le BECCS ne soit qu'un mirage (qu'on souhaite ou non le développer). Généralement, cette situation est expliquée par le coût élevé du BECCS associé à des prix du CO_2 insuffisants et fluctuants. Bien que ces freins soient réels, l'hypothèse faite ici est que le BECCS ne s'inscrit pas dans les logiques des acteurs des bioraffineries sur lesquelles le BECCS doit être installé.

Pour tester cette hypothèse, nous étudierons, dans la section suivante, la littérature scientifique et les discours en faveur du BECCS, en détaillant comment les visions générales se déclinent en principes d'action. Toutefois, cette littérature ne permet pas d'analyser les difficultés de terrain rencontrées par ceux qui cherchent à monter un démonstrateur ou un pilote de taille commerciale. C'est pourquoi la section 2 présente une étude de cas : celle des évolutions du projet CO2-DISSOLVED pour trouver un modèle économique susceptible de convaincre en investisseur potentiel. Cela nous permettra de comparer les attentes des acteurs des bioraffineries et du BECCS en section 3.

1 BECCS : Entre vision à long terme et retard de déploiement

Cette partie examine comment les narratifs sur le BECCS s'articule depuis ses caractéristiques technologiques jusqu'aux discours de légitimation les plus généraux appelés ici « visions ».

1.1 Caractéristiques et spécifications techniques du BECCS

Après avoir montré que le BECCS peut s'installer sur tout type de bioraffinerie produisant des bioénergies, nous expliquerons que cet ajout n'est pas neutre : le BECCS tend à renforcer les effets d'échelle préexistants tandis que la maximisation du profit de la bioraffinerie peut se faire au détriment des performances du BECCS. Ces arbitrages complexifient la recherche d'un modèle économique rentable.

1.1.1 Une technologie conçue pour les bioraffineries ?

Le BECCS est d'abord conçu comme un ajout à une usine préexistante à laquelle il doit s'adapter, plutôt que comme l'élément central autour duquel le reste de l'usine devrait s'articuler. Les sources ponctuelles de CO_2 biogénique sont de nature diverse. Ainsi, l'étude de Rosa *et al.* (2021) recense les applications suivantes en Europe : les usines de pâtes et papiers, la valorisation énergétique des déchets (incinérateurs),

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

les centrales électriques alimentées à la biomasse, les usines de retraitement des eaux usées avec production de biogaz et l'utilisation de résidus de culture pour produire du méthane. Les bioraffineries produisant des biocarburants (biodiesel et bioéthanol) peuvent aussi être sollicitées.

De ce fait, le BECCS peut être installé sur des usines qui ne sont pas à proprement parler des bioraffineries, mais inversement, le BECCS peut *a priori* être installé sur toutes bioraffineries produisant des bioénergies (biodiesel, bioéthanol, biométhane, autres biocarburants, électricité et chaleur).

1.1.2 Interactions entre le BECCS et l'usine émettrice

Concevoir le BECCS comme un simple ajout à une usine existante pourrait cependant amener à négliger les interactions entre l'usine et la technologie BECCS. Deux points sont ici essentiels à considérer : i) les effets d'échelle, ii) la flexibilité organisationnelle.

Concernant le premier point, soulignons que l'investissement initial est très lourd, surtout en comparaison des dépenses d'exploitation. Par conséquent, plus l'usine produira de tonnes de CO_2, plus le coût par tonne sera réduit. Concrètement, cela pourrait amener à agrandir les installations françaises de bioénergie. Ces agrandissements potentiels soulèvent des questionnements sur la provenance de la biomasse supplémentaire (ex. transport, conflits d'usage, intensification de la production) et sur l'acceptabilité locale de ces projets.

Concernant le second point, le terme de flexibilité organisationnelle désigne la capacité de l'usine à faire varier la production d'un output (ou d'en stopper momentanément la production). Cela pourrait amener à des arbitrages entre la production de CO_2 et les autres productions (Hennig *et al.*, 2023). Par exemple, une centrale électrique pourrait décider de ne pas utiliser le BECCS durant les pics de production. En effet, la capture du CO_2 est très consommatrice d'électricité et donc recourir au CCS lors des pics de production entraînerait un surcoût.

1.1.3 Un modèle économique à trouver

Le CO_2 stocké n'est – par définition – pas utilisé pour produire un bien. Inciter les entreprises à investir dans le BECCS passe donc par d'autres canaux comme un prix donné au carbone stocké, des subventions, voire une obligation légale. Le prix du carbone européen est volatile sur le long terme, ce qui n'incite pas à investir, d'autant que – comme déjà mentionné – le prix de l'investissement initial est très élevé : la durée du retour sur investissement risque d'être considérée comme trop longue. Il existe cependant un cas où le BECCS peut d'ores-et-déjà s'avérer rentable : celui de la récupération améliorée des hydrocarbures (Enhanced Recovery Oil, EOR).

Une autre façon de contourner la difficulté est de renoncer au stockage du CO_2 et d'en favoriser l'utilisation. Outre l'EOR, on pourra distinguer la valorisation biologique (par photosynthèse pour la pousse dans des serres ou des microalgues) et la valorisation chimique (ex. urée, acide salicylique, polycarbonates, méthanol, etc.) voir Kamkeng *et al.* (2020).

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

1.2 Visions et principes d'action du BECCS

Dans cette sous-section, nous identifierons une vision générale du BECCS qui se décline en deux variantes. Ces visions sont évidemment dépendantes des caractéristiques techniques vue précédemment, d'où la proposition d'une classification des arguments en 1.2.1. Nous revenons ensuite sur la vision générale, issue des travaux du GIEC, qui justifie l'intérêt pour cette technologie très controversée (1.2.2). La sous-partie 1.2.3 montre comment les différents niveaux de discours s'articulent et synthétise les résultats sous forme de tableau.

1.2.1 Principe de la classification proposée

Les narratifs présentés précédemment peuvent être perçus comme des tentatives de concilier, d'une part les impératifs techniques de production et les conditions de rentabilité, d'autre part avec les attentes de la société. Il s'agit donc d'asseoir la légitimité du BECCS et convaincre les autres acteurs – dont la société civile – du bien-fondé de cette solution.

Nous proposons de synthétiser les résultats sur les narratifs issus de la littérature en articulant quatre niveaux d'analyse interreliés : 1) les visions ; 2) les principes d'action ; 3) les conditions de rentabilité ; 4) les spécifications techniques. L'ordre présenté ici n'est pas un principe de causalité. Les spécifications techniques peuvent certes être à l'origine des conditions de rentabilité, principes d'action et visions, mais l'inverse peut également être vrai.

1.2.2 Les discours sur le BECCS, entre espoirs et inquiétudes

Le BECCS apparaît dès le début des années 2000 comme une variante du CCS et est intégré très rapidement dans les travaux des modélisateurs du GIEC pour concevoir des scénarios compatibles avec des hausses des températures égales ou inférieures à 2° C (Laude, 2020). Le GIEC recourt à des modèles dits IAM (Integrated Assessment Models) qui sont vivement critiqués. Certains auteurs s'interrogent directement sur les hypothèses choisies pour le développement de la technologie et donc sur son caractère réaliste comme Vaughan *et al.* (2016). D'autres auteurs vont plutôt pointer la méthodologie et les aspects épistémologiques des IAMs, avec la crainte que les mesures de CDR (Carbon Dioxide Removal) – dont les BECCS – risquent de retarder la transition (Keppo *et al.*, 2021). Des contre-discours sont construits sous la forme de scénarios pour proposer des alternatives à ces techniques CDR, qui soulignent davantage l'importance des habitudes sociales et des mesures de sobriété (Waller *et al.*, 2021).

D'autres critiques sont liées au stockage géologique. La technologie de capture requiert une consommation accrue d'électricité. Pour y répondre, il faut donc soit produire plus d'électricité (dont il faudra vérifier la soutenabilité), soit détourner une partie des bioénergies produites pour alimenter le système de capture. Il existe une inquiétude concernant un risque de surconsommation d'eau liée au CCS et d'autant plus pour le BECCS qui nécessite de l'eau pour la culture des végétaux (ou des algues), voir Rosa *et al.* (2021). Dans cette catégorie de critiques, nous trouverons aussi le risque

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

de fuites de carbone, qui pourrait remonter vers la surface si le site de stockage est mal choisi (Gholami *et al.*, 2021).

D'autres inquiétudes portent sur les bioénergies (ex. sécurité alimentaire, déforestation, entre autres). L'utilisation du BECCS pourrait donc renforcer ces effets néfastes, d'autant plus si le BECCS mène à l'agrandissement des usines existantes (ou à la création de nouvelles). Des auteurs mettent aussi en garde contre les problèmes sociaux et la nécessité de préserver les droits des peuples indigènes (risque de spoliation des terres ou de déplacement de population), voir Creutzig *et al.* (2023).

Du côté de ceux qui sont en faveur des technologies CCS et BECCS, d'autres arguments économiques peuvent apparaître. Janipour *et al.* (2021) expliquent ainsi que le CCS peut être vanté comme un moyen de soutenir l'emploi local et l'attractivité du port de Rotterdam. Plus précisément, le CCS pourrait éviter de fermer des entreprises polluantes ce qui pourrait maintenir l'industrie dans la région (argument très contesté par d'autres personnes interviewées). La transition écologique serait alors plus douce et plus « juste ». A l'inverse, la construction d'un « hub » recevant les émissions de plusieurs entreprises permettrait d'attirer de nouveaux investissements et de continuer d'utiliser les champs gaziers épuisés pour le stockage.

1.2.3 Discours du BECCS, des « visions » jusqu'aux spécifications techniques

Le BECCS repose sur un paradigme techniciste plutôt que sociétal. Ici, la vision qui domine est une *vision comptable et monocritère* du changement climatique, réduite à la seule question de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (voir tableau 1). Cibler les installations de bioénergies paraît efficace car elles constituent des sources ponctuelles d'émissions relativement importantes, ce qui permet de maximiser la quantité de CO_2 récupéré. Par ailleurs, le coût de l'investissement initial est élevé intrinsèquement et en comparaison avec les coûts de fonctionnement (spécification technique). Inciter les industriels à investir passerait donc par des subventions sur l'investissement initial et un prix du CO_2 relativement stable pour rentabiliser en priorité les coûts de fonctionnement, afin de limiter leur risque financier (conditions de rentabilité).

Un autre point crucial de cette vision générale est le suivant : « *Les puits de carbone naturels sont insuffisants, il faut les compléter par des puits de carbone artificiels* ». Cela induit qu'il y a équivalence entre le carbone contenu dans la biomasse « vivante » issue d'une forêt ou de cultures agricoles et le carbone contenu dans de la matière inerte, retirée des écosystèmes, et stockée dans des réservoirs géologiques. Ces deux formes de carbone doivent être traitées de façon indifférenciée et interchangeable, ce qui amène à un prix du CO_2 identique (principe d'action) et donc participe à la rentabilité des dispositifs. La preuve de l'existence technique du puits artificiels pourra passer par le monitoring des puits de forage pour vérifier qu'il n'y a pas de fuite et l'analyse du cycle de vie du procédé complet (spécifications techniques).

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

Cette vision générale comprend deux variantes :

1) « *Le BECCS comme dernier recours* » : Le stockage du carbone n'a lieu qu'en l'absence d'alternative de décarbonation ;
2) « *Le BECCS avec stockage maximisé* » : Le BECCS sert à créer des puits de carbone, le secteur d'activité est une question secondaire.

La première variante vise à limiter le BECCS aux secteurs d'activité où la décarbonation par d'autres moyens est difficile. L'objectif premier est de se rapprocher de la neutralité carbone avec une réflexion par secteur d'activité. Cela semble être la position visée par le gouvernement français lorsqu'il indique viser les usines les plus émettrices qui doivent choisir leur stratégie pour se décarboner (Ministère chargé de l'énergie, 2023). Le déploiement du BECCS aurait lieu à moyen terme pour être cohérent avec les objectifs de neutralité carbone. Le BECCS apparaît comme une solution gagnant-gagnant car elle permet de fournir de l'énergie tout en émettant moins.

Tableau 1 : Légitimation des discours sur le BECCS : Visions, principes d'action, conditions de rentabilité et spécifications techniques

Nom des visions	Caractéristique des visions	Principes d'action	Conditions de rentabilité	Spécifications techniques
Vision générale	Vision comptable et monocritère	Viser des sources ponctuelles de carbone les plus grandes possibles (effet d'échelle)	Subvention sur l'investissement initial, prix du carbone élevé et stable pour le fonctionnement.	Coût d'investissement initial élevé
	Vision du « Puits de carbone artificiel »	Equivalence entre toutes les sources de CO2	Décompte des émissions identique pour la biomasse et les émissions fossiles	Preuves de l'efficacité par le monitoring du puits d'injection, la mesure des émissions et les Analyses de Cycle de Vie
Variante 1 : BECCS en dernier recours	Le BECCS fait partie d'un panel de solutions et est controversée Neutralité carbone	Solution de dernier recours	Valoriser la flexibilité technique du système	Pouvoir utiliser le CCS par intermittence Arbitrage entre stockage et utilisation du CO2
Variante 2 : Maximisation du stockage	Les technologies de CDR doivent être mobilisées au maximum	Maximisation des quantités stockées	La rentabilité financière des industrielles n'est pas la priorité	Produits biosourcés secondaires par rapport à la production de bioénergies
	Emissions négatives visées		Modèle économique tourné vers le BECCS	

La seconde variante repose davantage sur l'obtention d'émissions négatives, avec un rôle dévolu au BECCS de régulateur du climat à l'échelle du siècle, à côté d'autres solutions comme l'afforestation, le biochar ou la capture du CO_2 à partir de l'air. Ces technologies sont à la fois complémentaires (car aucune ne peut réaliser les objectifs climatiques seule) et en concurrence (ne serait-ce que sur les ressources financières pour les développer). Le focus est mis sur la maximisation du CO_2 à stocker, car la priorité est la réduction du changement climatique. Dans cette optique, le rôle des

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

usines pourrait être d'abord de pourvoir au stockage du carbone, quitte à ce que les autres productions des bioraffineries soient marginalisées. Cela pourrait passer par une obligation pour certaines installations à recourir au BECCS.

2 Evolution d'un projet de recherche sur le stockage du carbone en France

Cette partie a pour objectif de présenter les évolutions d'une série de projets de recherche pilotés par le BRGM de 2007 à aujourd'hui concernant le BECCS. Tout au long de ces années, outre les aspects de recherche, il y a toujours eu la volonté d'aboutir à un pilote ou démonstrateur permettant de capturer et stocker du CO_2 à une échelle commerciale ou presque. Pour cela, il faut trouver une entreprise fournissant le CO_2 et qui accepte d'investir dans les installations afférentes au CCS. C'est évidemment une pierre d'achoppement, puisqu'il faut prouver la rentabilité de la technologie, dans un contexte politique pas toujours favorable au BECCS et au CCS en général. C'est dans ce cadre que nous étudierons trois périodes présentant trois mutations majeures du projet initial. Nous ne détaillerons pas les aspects géologiques ici.

2.1 Projet initial : Le projet « CPER Artenay »

Ce premier projet a lieu dans le cadre d'un contrat Etat-Région, appelé CPER Artenay, financé par le fond européen FEDER, la Région Centre et le BRGM (Bureau des Ressources Géologiques et Minières), entre 2008 et 2010.

2.1.1 Contexte du projet

Lorsque le projet démarre, la recherche sur le BECCS n'en est encore qu'à ces débuts (Laude, 2020). Le nombre de projets existants est très limité. On pensera par exemple au projet « Russel EOR » achevé en 2005 et au projet « Arkalon » démarré en 2009, tous deux avec récupération assistée du pétrole.

Par ailleurs, le contexte de l'époque est aussi celui de controverses concernant les agrocarburants, non seulement à cause de la concurrence entre usages alimentaires et non alimentaires, mais aussi en raison du risque de déforestation. C'est particulièrement le cas pour le bioéthanol à partir de cannes à sucre provenant du Brésil. Le bioéthanol à partir de betteraves peut alors sembler plus soutenable. Le BECCS appliqué au bioéthanol betteravier apparaît comme un moyen d'améliorer le bilan carbone, un point qui est explicitement mentionné dans le premier article de l'équipe : « *In conclusion, this process seems to be a good option to close the controversy about the life cycle of bio-fuels at an acceptable price for the consumer, given that this kind of distillery is included in the European Trade Scheme* » (Bonijoly *et al.*, 2009). L'idée sous-jacente est que les "sucreries – distilleries" devraient valoriser le CO_2 évité en le revendant sur le marché du carbone européen, ce qui paraît d'autant plus crédible que ces installations sont déjà intégrées dans ce système. Néanmoins, pour que cela soit effectif, il faudrait que l'Union Européenne reconnaisse cette technologie dans l'EU ETS (Emission Trading Système) – autrement dit, le marché du carbone européen - ce qui n'était pas le cas, mais pouvait être envisagé.

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

2.1.2 Présentation et objectifs du projet

Le nom du projet « CPER Artenay » tire sa source de la ville d'Artenay, située en région Centre Val de Loire, où se situe une sucrerie-distillerie produisant du sucre et du bioéthanol. Non loin de là, une autre sucrerie-distillerie est opérationnelle. Pour produire du bioéthanol, il est nécessaire d'avoir recours à une étape de fermentation anaérobie (sans oxygène) qui dégage du CO_2 presque pur. Cela représente un avantage économique indéniable dans la mesure où l'étape de séparation des gaz est supprimée alors qu'elle représente habituellement le poste de dépense principal pour une chaîne CCS. La présence de deux usines dans la zone permet aussi d'envisager la création d'un début de réseau de pipelines, ce qui permettrait de diminuer les coûts de transport. A noter que les deux usines sont alimentées chacune par une chaudière au gaz, dont on pourrait envisager de stocker aussi le CO_2.

Bien entendu, ce stockage ne pourra être effectif que si la géologie du site de stockage le permet. Des études antérieures ont montré que tel pourrait être le cas sur la zone considérée (500 km^2 entre Orléans et Pithiviers). Les analyses menées ont permis de confirmer les bonnes propriétés des formations géologiques envisagées (des aquifères salins) ainsi que l'intégrité du caprock, même si des études complémentaires sont recommandées (Bonijoly *et al.*, 2009). Ce terme de caprock (ou cap rock) désigne un type de couches rocheuses (le plus souvent en sel, shiste ou anhydrite) situé au-dessus d'une formation géologique (ou réservoir) et qui s'avère relativement étanches et capable de retenir des fluides, ici du CO_2 qui aurait tendance à remonter du fait de la pression.

2.1.3 Résultats technico-économiques

Sur le plan environnemental, les simulations avec capture sur les deux sources d'émissions montrent que les émissions négatives peuvent être obtenues, mais au prix d'une pénalité énergétique (*i.e.*, une surconsommation d'énergie dues au CCS) très élevée (environ 30% d'augmentation de la consommation énergétique). Si la capture a lieu uniquement sur la fermentation et une seule usine, la réduction des émissions est de 62% avec une pénalité énergétique très faible (3,8% d'augmentation).

L'étude technico-économique va mettre en exergue une autre difficulté : la betterave sucrière étant une récolte saisonnière, les installations (captage, compression, transport et puits d'injections) doivent être surdimensionnées pour faire face au pic de production automnal. Cela va fortement impacter la rentabilité des projets, comparée aux estimations précédentes du système « BECCS-éthanol » qui se basaient sur la production annuelle de canne à sucre. Si les deux bioraffineries sont reliées par pipelines, et que seules les émissions sur la fermentation sont stockées, le prix de la tonne de CO_2 évitée est de 56 €, contre 131 € si une seule bioraffinerie est considérée et que les émissions issues de la chaudière au gaz naturel sont aussi récupérées, voir Laude *et al.* (2011). Or ces prix du carbone évité sont très loin de ceux observés sur le marché européen sur cette période. Si à la fin de la phase I (fin 2007), les prix se rapprochaient des 30 €/tCO_2, ils baissèrent considérablement ensuite sur la période concernée par le projet (ex. 6,50 €/tCO_2 au comptant en janvier 2012). Il n'est donc pas surprenant que les dirigeants des deux sucreries-distilleries se soient montrés fri-

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

leux face à ce projet, jugé trop risqué. Par la suite, les discussions se poursuivront avec l'usine d'Artenay, mais pas avec celle de Toury.

2.2 Le projet CO2-DISSOLVED (2013 – 2016)

Le projet suivant, nommé CO2-DISSOLVED, s'est déroulé de janvier 2013 à mai 2016 et a fait l'objet d'un financement par l'ANR.

2.2.1 Présentation du projet et principaux résultats scientifiques

Le projet CO2-DISSOLVED s'inscrit dans la lignée du précédent. Toutefois, il s'en démarque car il prévoit un nouveau système de captage et surtout de coupler le stockage du CO_2 avec de la géothermie. Outre la validation géologique et technico-économique, l'équipe recherche activement un site pour construire un pilote. Le consortium s'étend désormais à de nouveaux acteurs, tant français qu'étrangers (Etats Unis pour la technologie de capture, Allemagne pour la recherche de sites émetteurs). Le principe général de la technologie CO2-DISSOLVED est le suivant : la géothermie permet de récupérer de la chaleur issue de la saumure (de l'eau très salée) extraite du sous-sol (à environ 50 à 90° C) *via* un échangeur thermique. Puis, cette même eau va être réinjectée dans l'aquifère salin. La nouveauté consiste à saturer l'eau avec du CO_2 sous forme dissoute avant de réinjecter l'eau. Le système de capture est également innovant et se base sur une technologie fournie par « Partning In Innovation », un partenaire américain (Kervévan *et al.*, 2017). Ce nouveau système de capture serait meilleur sur le plan environnemental par rapport aux systèmes de séparation des gaz habituels car il n'y a pas d'autre solvant que de l'eau qui soit utilisé. Cela mènerait aussi à une diminution par deux des coûts de séparation des gaz.

CO2-DISSOLVED est conçu pour s'adapter à des émetteurs de taille moyenne ou modeste. En effet, le flux de stockage est limité par la rapidité de solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau salée. La production de chaleur générée par la géothermie permet de compenser la pénalité énergétique inhérente au CCS dont nous avons parlé plus tôt. Cette chaleur peut être récupérée par l'usine ou distribuée dans un réseau de chaleur à des habitations. Dans le cas de l'usine d'Artenay, c'est la première option qui est envisagée (par manque d'habitations à proximité). Les principaux résultats technico-économiques sont les suivants :

1) Initialement, il était prévu une solution avec deux puits (injection et production) avec la solution Pi-innov dans l'un deux. Toutefois, il est préférable de creuser un troisième puits (si une étape de purification est nécessaire), pour des raisons de coûts, de maintenance et d'efficacité, car Pi-innov est optimisée dans des puits à larges diamètres alors que la géothermie privilégie de plus petits diamètres.

2) Les bilans carbone et énergie se basent sur le cas avec stockage du carbone sur la fermentation uniquement, donc avec deux puits et sans Pi-Innovation. CO2-DISSOLVED réduit les émissions de CO_2 de l'usine de 24 à 62% selon le scénario testé. C'est moins que pour le projet Artenay. Par contre, il n'y a plus de pénalité énergétique puisque la géothermie permet de compenser les besoins en compression du CO_2. La réduction de la consommation en énergie

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

non-renouvelable oscille entre 5% et 28%, alors qu'il y avait augmentation de la consommation auparavant (Royer-Adnot et Le Gallo, 2017).

3) Les sources de revenus considérées sont liées à la valorisation du CO_2 sur le marché du carbone. Il y a certes le CO_2 stocké dans le réservoir, mais aussi le CO_2 évité *via* l'utilisation de l'énergie géothermale ce qui diminue les besoins en gaz naturel. L'analyse de sensibilité révèle aussi que les résultats sont très sensibles au prix du gaz. Ainsi dans un scénario très favorable sur l'investissement initial et le prix du gaz, un prix du carbone du 10 €/tCO_2 peut être suffisant pour rendre le projet rentable. L'étude ne permet donc pas de trancher sur une meilleure rentabilité de CO2-DISSOLVED comparé au projet initial, compte tenu des incertitudes, même si tendanciellement cela semble être le cas (Royer-Adnot et Le Gallo, 2017).

2.2.2 Contexte du projet et enseignements

Les discussions avec les dirigeants d'Artenay ont fait apparaître à l'époque, qu'ils étaient peu intéressés par le BECCS. Outre les risques technologiques et financiers, ils ont mentionné qu'ils avaient changé leur chaudière au gaz naturel. Cela peut paraître anecdotique, mais cela avait permis de diminuer leurs besoins en quotas carbone dans un contexte où le prix du carbone était très bas. En effet, la période couverte par le projet correspond à la première partie de la phase III du SCEQE (système communautaire d'échange de quotas d'émission), qui s'étend de 2013 à 2020. Or, de 2013 à 2017 environ, le prix du carbone gravitait autour de 5 € la tonne. Des prix qui évidemment ne justifient pas des investissements d'ampleur à long terme. Par ailleurs, l'amélioration de la chaudière diminue également l'intérêt de recourir à une autre source d'énergie complémentaire, comme la géothermie. Rappelons qu'à cette époque, le gaz naturel était moins onéreux qu'aujourd'hui.

Les difficultés de CO2-DISSOLVED pour trouver un financement de démonstrateur ne sont pas spécifiques à ce projet. Au contraire, le retard de développement du CCS est notoirement connu et référencé. La plupart des projets à large échelle ont été annulés sur cette période à travers le monde (Wang *et al.*, 2021). Les raisons le plus souvent invoquées sont financières : la part des financements publics serait insuffisante et la rentabilité trop faible pour les investisseurs privés. Mais, dans l'UE, les Etats membres ont souvent été réticents à transposer la législation européenne. Certains Etats ont totalement interdit le CCS sur leur territoire, tandis que d'autres ont restreint le stockage annuel comme l'Allemagne.

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

2.3 Projets « CO2- DISSOLVED » ultérieurs

Cette partie s'efforce de retracer l'évolution du concept « CO2-DISSOLVED » sur la période de mai 2016 à octobre 2021.

2.3.1 Présentations et enseignements

Trois projets de recherche sont décomptés sur la période considéré. Deux se succèdent et sont financés par Géodenergies, à savoir les projets « PILOTE CO2-Dissolved » de juin 2016 à mai 2018 puis « CO2-DISSOLVED*INJECTION » d'octobre 2018 à mars 2020. Ce dernier était censé être la première phase avant la construction effective d'un démonstrateur, qui n'aura pas lieu. En parallèle, la Région Centre-Val de Loire finança le projet « GEOCO2 » de septembre 2018 à octobre 2021.

Le premier projet va poursuivre les investigations concernant le comportement du sous-sol à la suite de l'injection, mais il vise aussi à affiner l'identification des émetteurs compatibles en France, l'objectif principal étant la recherche d'un site industriel pilote. Les caractéristiques idéales du site sont dorénavant bien cernées : le taux d'émissions doit être compatible avec les capacités de solubilité, donc pas trop important ; le flux de CO_2 doit être quasiment pur pour éviter une étape de séparation des gaz ; il faut un potentiel géothermique local. La question de l'acceptabilité sociale fait son apparition, le site Internet signalant qu'il faut un intérêt pour la population locale, tels que conserver des emplois. Le projet « GEOCO2 » détaille la liste de ces émetteurs dans la région Centre – Val de Loire et prévoit explicitement le contact avec les industriels locaux pour pré-dimensionner les installations à partir de la carte créée. De son côté, le projet « CO2-DISSOLVED*INJECTION » se focalise sur des questions géologiques (Marty *et al.*, 2020).

La recherche d'un émetteur a aussi permis d'identifier les Pays-Bas comme un pays potentiellement propice. En effet, ce pays prévoit d'augmenter son nombre de système géothermique de 17 en 2018 à 175 en 2030 et même 700 en 2050. Dans cette étude de cas, il y a deux puits producteurs et un puits d'injection (avec la solution de capture Pi-CO2), tous trois situés dans le Westland, non loin de Rotterdam. La chaleur issue de la géothermie alimente une serre. Le dioxyde de carbone peut aussi être utilisé dans les serres pour augmenter la croissance des végétaux (l'été) tandis qu'il est prioritairement stocké l'hiver *via* CO2-DISSOLVED. Sur le plan économique, les puits de production géothermiques étant déjà existants, il n'y a plus qu'un puits à forer (pour le stockage). Le coût total avoisinerait les 1,2 millions d'euros. Avec un prix du CO_2 de 21 € la tonne, ce type de projet semble viable. Il y a donc là un vrai saut en termes de rentabilité du projet comparé aux cas précédents (Koenen *et al.*, 2018).

Enfin, la compétence du BRGM pour les technologies de couplage géothermie/stockage du carbone a été reconnue par l'Agence Internationale de l'Energie, à laquelle un rapport a été remis (IEAGHG, 2023).

2.3.2 Contexte des projets

Cette présentation serait incomplète, si on ne signalait pas l'existence d'autres projets menés par le BRGM, comme CO2SERRE entre 2019 et 2022 (Gravaud *et al.*,

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

2021). Dans ce projet, on retrouve une configuration proche de celle explorée aux Pays-Bas : Là aussi, il s'agit d'utiliser une partie du CO_2 pour alimenter des serres prioritairement et stocker le CO_2 surnuméraire. Cette fois, l'émetteur est une usine de cogénération à partir de biomasse située à Orléans. Cela laisse espérer l'existence d'émissions négatives au prix d'un surcoût car la purification des gaz sera inévitable.

Sur la période considérée, on constate toujours un véritable gouffre entre les objectifs annoncés pour le développement du CCS et la réalité du terrain. En 2020, il n'y avait que 26 sites opérationnels (capture et stockage) à travers le monde et seulement deux en Europe (Spleiner et Snohvit, en Norvège), d'après le site Internet du Global CCS Institute.

Toutefois, certains facteurs deviennent plus favorables au BECCS. Ainsi, le prix du carbone augmente sur la période, en raison de l'effet rebond après la période covid et des conséquences de la guerre en Ukraine, mais aussi des réformes du marché européen : réserve de stabilité, anticipation de la baisse des plafonds en 2030 et de la suppression des quotas gratuits en 2034. En France, une consultation est lancée en 2023 sur le CCS. Il est précisé que le CCS doit servir à réduire les « *émissions résiduelles incompressibles, en l'absence d'autres solutions de décarbonation économiquement accessibles ou comme une solution de transition* ». Cette stratégie vise les 50 sites industriels les plus polluants afin de diminuer par deux leurs émissions d'ici 2030, *via* le CCS, l'électrification des procédés (en remplacement de moteurs et de chaudières), le recours à la biomasse et à l'hydrogène (Ministère chargé de l'Industrie, 2023). Pour le CCS, l'objectif serait de 4 à 8MtCO_2 à l'horizon 2030 et de 15 à 20 en 2050.

3 Résultats et discussion : Une compatibilité partielle des attentes des acteurs

Dans cette partie, nous verrons que les attentes entre acteurs des bioraffineries et du BECCS sont distinctes et peuvent ne pas converger, surtout pour la vision de « maximisation du stockage ». Cela est vrai pour toutes les variantes du BECCS et *a fortiori* pour notre cas d'étude, le projet CO2-DISSOLVED. Nous montrerons ensuite comment le projet a évolué pour chercher un modèle économique compatible avec l'ensemble des attentes.

3.1 Des logiques partiellement convergentes

Le BECCS étant prévu pour s'installer sur les bioraffineries, il en partage certaines logiques productivistes (ex. légitimation des bioénergies, agriculture conventionnelle), expliquée en 3.1.1. Pour autant, les bioraffineries valorisent fortement le concept d'économie circulaire, alors que le CO_2 est traité comme un déchet ultime par les promoteurs du BECCS. Enfin, le BECCS n'est qu'une technologie de décarbonation parmi d'autres du point de vue des bioraffineries.

3.1.1 Les points de convergence : Besoin d'une biomasse abondante et commodifiée

De prime abord, le BECCS semble avoir des conséquences mineures sur l'usine sur laquelle il est implanté sur le plan des spécifications techniques. En effet, le BECCS

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

est conçu pour s'adapter aux bioraffineries, qui pourraient ainsi s'accommoder d'un output supplémentaire à valoriser, le CO_2, si toutefois le procédé s'avère rentable. Certes, le principe d'action du BECCS n'est pas celui du raffinage de la biomasse, mais par contre, la vision générale est compatible avec l'idée de la lutte contre le changement climatique par le biais des bioénergies en substitution aux énergies fossiles. De plus, le BECCS, comme les bioraffineries, convergent vers un objectif de massification de la biomasse pour maximiser les effets d'échelle. Certaines inquiétudes, comme la concurrence entre les usages de la biomasse, sont aussi des thématiques partagées par les deux communautés. Dans ce cas précis, les solutions proposées passent par la recherche de la valorisation de nouvelles sources de biomasse (résidus, pailles) ou issues de terres dégradées. Dans les deux cas, les sols, comme les terres, sont considérés comme des substrats neutres et le terme même de « biomasse » tend à égaliser les différentes ressources entre elles, qui ne sont plus que des produits commodifiés en partie interchangeables. L'importance de la biomasse comme vecteur de la biodiversité participant à des écosystèmes semble absent du discours.

3.1.2 De l'économie circulaire à la préférence pour l'utilisation du CO_2 et la flexibilité

Ceci dit, la biomasse n'est pas perçue de façon identique, puisque le BECCS ne s'intéresse qu'au CO_2 en tant que gaz à effet de serre, alors que les bioraffineries y voit un panel d'outputs et d'usages potentiels. Dans cette optique, la rentabilité de la bioraffinerie dépendra de ces autres outputs plus que de la vente du CO_2, au moins dans un futur proche. Les dirigeants de ces usines pourraient arbitrer entre leurs productions et faire du CO_2 une variable d'ajustement, auquel ils pourraient renoncer au moins temporairement (notion de flexibilité organisationnelle vue plus haut).

De plus, les acteurs des bioraffineries légitiment leurs actions non seulement par l'argument de la substitution aux énergies fossiles, mais aussi par celui de l'économie circulaire et de l'écologie industrielle. Or, le BECCS a pour conséquence de retirer le CO_2 des boucles de flux industriels. Si on ajoute que les conditions de rentabilité du BECCS ne sont, à ce jour, pas remplies (prix du CO_2 stables sur le long terme et subventions), alors il n'est pas étonnant que l'utilisation du CO_2 soit une voie de valorisation privilégiée par certains, même si le bénéfice environnemental est moindre.

Il est donc patent que la vision générale du BECCS n'est pas partagée. La vision dite du « dernier recours » pourrait être plus facile à mobiliser à moyen terme que la vision dite de « maximisation du stockage » qui ferait du stockage du carbone l'objectif premier des bioraffineries. Mais même la première vision est concurrencée par d'autres argumentaires qui valorisent le bouclage des flux et – indirectement – l'utilisation du CO_2.

3.1.3 Arbitrage interne aux bioraffineries : concurrence sur les technologies de décarbonation

L'un des discours affichés par les promoteurs des bioraffineries est celui de l'optimisation technique et de l'efficacité énergétique. Cela pourrait entrer en contradiction avec le CCS dans la mesure où il provoque une consommation accrue d'électricité (et

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

d'eau). Les acteurs pourraient avoir l'impression que le CCS « annihile » les efforts consentis en ce sens. Qui plus est, les acteurs peuvent choisir d'autres technologies pour diminuer leurs émissions. Ainsi, on pourra penser que le passage à la biomasse suffit pour des usines fonctionnant initialement aux énergies fossiles (ex. centrales électriques au charbon). Cela est compatible avec la vision du BECCS comme dernier recours pour la décarbonation sectorielle, en vue de la neutralité carbone. Cela peut aussi entraîner une concurrence avec d'autres techniques de décarbonation. Un autre exemple en est l'électrification qui pourrait remplacer les chaudières au gaz naturel (Oke *et al.*, 2022).

3.2 L'implémentation d'un pilote BECCS comme processus de rapprochement des attentes

L'origine du BECCS dans les instances internationales du GIEC a donné lieu a une approche descendante (top-down) de la technologie qui tend à négliger les conditions d'implémentation (3.2.1). A l'inverse, la tentative de construction d'un pilote souligne les trois formes de concurrence subie par le BECCS (3.2.2), mais aussi les façons de les dépasser (ex. hybridations avec d'autres technologies).

3.2.1 Le BECCS une technologie « top-down » ?

Le BECCS a d'abord été conçu pour répondre à la demande de scénarios du GIEC compatibles avec les attentes sociétales pour des hausses des températures « modérées ». Pour cela, les modélisateurs ont cherché des techniques pour retirer le CO_2 présent dans l'atmosphère : afforestation et BECCS, ce dernier étant relativement facile à intégrer dans les modèles. Il n'est donc pas étonnant que les questions d'ancrage territorial soient (quasiment) absentes des discours sur le BECCS, alors qu'elles constituent des enjeux clé pour les acteurs des bioénergies. Dans la littérature, le territoire d'accueil du BECCS n'est qu'un lieu de collecte en ressources biomasse préexistantes, à deux exceptions près : la question de l'acceptabilité sociale pour le stockage du carbone et la construction de réseau de pipelines pour le transport du CO_2.

Avec la mise en place de pilote, la dimension locale ne peut plus être éludée, ne serait-ce que sur l'angle des emplois et des relations entre entreprises du territoire (Janipour *et al.*, 2021).

3.2.2 La triple concurrence au projet CO2-DISSOLVED

Parallèlement à ce manque de considération pour le local, nous avons vu que le BECCS subit une triple concurrence (amont, interne et aval) qui affecte le projet (section 3.1).

Le concurrence interne sur les choix de productions de l'usine. Dans le cas présent, l'usine considérée produisait principalement du sucre et de l'éthanol. L'hypothèse était que la moitié des betteraves entrantes étaient destinées à la production de bioéthanol. Il est évident que si la totalité était allouée aux agrocarburants, des effets d'échelle substantiels pourraient être réalisés pour les BECCS.

La concurrence en amont (sur les méthodes de décarbonation) a aussi joué sur le manque d'intérêt pour la construction d'un pilote. En effet, le prix du CO_2 a été

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

faible pendant la majorité de la période et marqué par de très fortes incertitudes, ce qui n'était pas favorable à des projets d'ampleur, mais plutôt à des ajustements ou à des projets avec des co-bénéfices. Ainsi, certains dirigeants ont opté pour le financement d'une nouvelle chaudière au gaz naturel, permettant à la fois d'économiser du gaz naturel et de réduire leurs émissions. Il y a donc un effet d'éviction de la technologie BECCS, pénalisée par une logique de « dernier recours » dans un contexte de faible volonté politique. De façon plus indirecte, il y avait aussi une concurrence entre stockage géologique du carbone et stockage dans les sols agricoles du carbone. Outre la quasi homonymie des termes, le stockage dans les sols agricoles a bénéficié du lancement de l'initiative 4 pour mille en 2015 (une initiative lancée par la France lors de la COP21 et devenue internationale). Le stockage dans les sols agricoles était mieux connu des acteurs et correspondait davantage à une logique d'économie circulaire tout en ayant une apparence de naturalité.

La troisième forme de concurrence (en aval) a aussi été observée au cours du projet, avec une appétence nette pour la valorisation du CO_2 sous diverse formes industrielles. Ce thème était abordé spontanément dans les réunions ou présentations avec des acteurs des bioénergies.

3.2.3 Hésitations et évolution du modèle d'affaires proposé par CO2-DISSOLVED

Le projet CO2-DISSOLVED se présente donc comme une évolution du projet initial (dit CPER Artenay) pour répondre aux enjeux suivants : i) éviter la surconsommation d'énergies fossiles ; ii) contourner le manque d'effet d'échelle ; iii) trouver un modèle économique plus rentable. L'innovation consistant à avoir recours à la géothermie en complément du stockage géologique permet de fournir une source d'énergie (sous forme de chaleur) à l'entreprise qui peut dès lors réduire sa consommation de gaz naturel. De façon moins immédiate, CO2-DISSOLVED va aussi convertir une contrainte technique en opportunité : le système ne permet pas de stocker autant de CO_2 par heure que le système initial (dit de stockage avec du CO_2 supercritique), car il faut dissoudre le CO_2 dans la saumure, ce qui prend du temps. CO2-DISSOLVED n'est donc pas destiné aux grandes sources d'émissions mais à des émetteurs de petites ou moyennes tailles. Ce positionnement est novateur, car ces émetteurs étaient considérés comme inadaptés pour le stockage du carbone. Cette technologie présente donc un modèle économique spécifique pour les petites sources. Le nouveau projet renonce aussi à la capture des émissions issues de la chaudière au gaz naturel. Le stockage géologique couplé avec la géothermie permet aussi de diversifier les zones de stockage : avec ce système, il n'est plus nécessaire d'avoir une roche de couverture (caprock) au-dessus de la zone de stockage, car le CO_2 dissous dans la saumure n'a pas tendance à remonter.

La vision présentée par CO2-DISSOLVED est plus proche de celle du BECCS de « dernier recours », au sens où c'est bien le BECCS qui s'adapte à l'usine et non l'inverse. Le stockage serait maximisé si l'entreprise privilégiait la production d'éthanol à celle du sucre (concurrence interne de production), ou si la chaudière au gaz était remplacée par une chaudière biomasse avec capture (concurrence amont).

Les modifications proposées n'ont pas été suffisantes pour déclencher la construction d'un pilote, dans un contexte global peu favorable au CCS (principalement un prix

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

du CO_2 faible, crainte d'une mauvaise acceptabilité sociale). L'équipe envisage alors une concession : celui de ne stocker qu'une partie des émissions, l'autre étant destiné à l'utilisation du CO_2, ici comme stimulateur de croissance de plantes sous serre (concurrence aval).

Nous constatons donc que le projet de recherche « mute » pour prendre en compte les différentes formes de concurrence au projet initial. Il y a une forme d'hybridation avec ces dernières pour explorer différents modèles économiques et tenter de sélectionner les plus performants. Cette exploration se fait *via* une recherche systématique des émetteurs potentiels et des lieux de stockage (cartographie) d'une part, mais aussi par le biais de discussions avec les dirigeants des usines émettrices, d'autre part. Une autre mutation apparaît : Initialement, la géothermie était envisagé comme un revenu complémentaire au stockage du CO_2 qui est l'objectif principal du forage. L'interlocuteur privilégié est donc l'émetteur. Peu à peu, le stockage apparaît comme un complément de revenu pour l'opérateur de géothermie. Là encore, c'est bien la vision de « dernier recours » qui transparaît.

Conclusion

L'attention portée au BECCS provient de sa capacité à retirer du CO_2 de l'atmosphère, ce qui en a fait une des technologies intégrées dans les modèles du GIEC avec des scénarios d'élévation de la température limitée. Ceci dit, les modèles du GIEC propose des perspectives à long terme et traitent peu des conditions de mise en route de la technologie.

Bien entendu, les faibles incitations économiques sont déterminantes. Mais nous montrons aussi que la vision très « top-down » qui a prévalu est éloignée des préoccupations des acteurs des bioraffineries. Pour ce faire, nous avons construit une grille multi-niveaux allant du discours le plus général et stratégique (nommé vision) jusqu'aux caractéristiques techniques de fonctionnement des usines du BECCS. Deux visions sont identifiées : celle du BECCS en « dernier recours » qui est celle retenue actuellement et celle du BECCS comme « maximisation du stockage » plus compatible avec les objectifs à long terme du GIEC. La vision « en dernier recours » pénalise évidemment le déploiement du BECCS mais peut se comprendre de par les craintes qu'il suscite.

Les mutations du projet CO2-DISSOLVED pour prendre en compte les attentes de ces acteurs montrent qu'une approche bottom-up est nécessaire, pour adapter le BECCS aux conditions locales. Nous mettons en évidence une triple concurrence aux pilotes BECCS que ce soit en amont (autres technologies de décarbonation), interne à l'usine (entre productions) et en aval (stockage *versus* utilisation). Si la troisième forme de concurrence est bien référencée dans la littérature, les deux premières ne sont pas clairement identifiées et encore moins les trois ensembles. Enfin, bioraffineries comme BECCS présentent une multitude de variantes technico-économiques ce qui peut complexifier la recherche de modèles économiques viables. Une attitude exploratrice, privilégiant l'analyse de terrain, apparaît pertinente. Ainsi, des recherches complémentaires portant sur d'autres projets de démonstrateurs permettraient d'approfondir les résultats de cet article.

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

Références

Bonijoly, D. ; Fabbri, A. ; Chapuis, F. ; Laude, A. ; Ricci, O. ; Bauer, H. ; Grataloup, S. ; Galiègue, X. (2009), « Technical and economic feasibility of the capture and geological storage of CO_2 from a biofuel distillery : CPER Artenay project », *Energy Procedia,* 1, p. 3927-3934. doi :10.1016/j.egypro.2009.02.196

Creutzig, F. ; Erb, K. ; Haberl, H. ; Hof, C. ; Hunsberger, C. ; Roe, S. (2021) « Considering sustainability thresholds for BECCS in IPCC and biodiversity assessments », _GCB Bioenergy,_13, p. 510–515. doi :10.1111/gcbb.12798

IEAGHG (2023) « Prospective integration of Geothermal Energy with Carbon Capture and Storage (CCS) », *IEAGHG Technical Report* 2023-02.

Gholami, R. ; Raza, A. ; Iglauer, S. (2021). « Leakage risk assessment of a CO2 storage site : A review », *Earth-Science Reviews*, 223, 103849. doi :10.1016/j.earscirev.2021.103849

Gravaud, I. ; Veloso, F. ; Prézélus, F. : Bidel, A. ; Galiègue, X. (2021) « Biomass origin carbon capture, storage and utilization in greenhouses : the CO2SERRE project in Centre-Val de Loire (France) », *GHGT-15*, Abu Dhabi, United Arab Emirates. hal-03672463

Hennig, C. ; Olsson, O. ; Thrän, D. ; Mäki E. (2023) « BECCUS and flexible bioenergy – finding the balance », *IEA Bioenergy Task 44*.

IPCC (2022) « Climate Change 2022 : Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ».

Janipour, Z. ; Swennenhuis, F. ; de Gooyert, V. ; de Coninck, H. (2021) « Understanding contrasting narratives on carbon dioxide capture andstorage for Dutch industry using system dynamics » *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 105, 103235. doi : 10.1016/j.ijggc.2020.103235

Kamkeng, A. ; Wang, M. ; Hu, J. ; Du, W ; Qian, F. (2021) « Transformation technologies for CO2 utilisation : Current status, challenges and future prospects », *Chemical Engineering Journal*, 409, 128138. doi : 10.1016/j.cej.2020.128138

Kervévan, C. ; Beddelem, M.-H ; Galiègue, X ; Le Gallo, Y. ; May, F. ; O'Neil, K. ; Sterpenich, J. (2017) « Main Results of the CO2-DISSOLVED Project : First Step toward a Future Industrial Pilot Combining Geological Storage of Dissolved CO2 and Geothermal Heat Recovery », *Energy Procedia*, 114, 4086-4098. doi : 10.1016/j.egypro.2017.03.1549

Koenen, M. ; Neele, F. ; Hofstee, C. ; Hanegraaf, M. ; Kervévan, C. (2018) « Combined geothermal and dissolved CO2 storage system – Example of application to a geothermally heated greenhouse area in The Netherlands », *GHGT-14*, Melbourne, pp 1-8.

Keppo, I. ; Butnar, I. ; Bauer, N. ; Caspani, M. ; Edelenbosch, O ; Emmerling, J. ; Fragkos, P. ; Guivarch, C. ; Harmsen, M. ; Lefèvre, J. ; Le Gallic, T ; Leimbach, M., McDowall, W ; Mercure, J.-F. ; Schaeffer, R. ; Trutnevyte, E. ; Wagner, F. (2021) « Exploring the possibility space : taking stock of the diverse capabilities and gaps in integrated assessment models », *Environmental Research Letters*, 16, 053006. doi : 10.1088/1748-9326/abe5d8

Laude, A. ; Ricci, O. ; Bureau, G. ; Royer-Adnot, J. ; Fabbri, A. (2011) « CO_2 capture and storage from a bioethanol plant : Carbon footprint and Economic Assessment », *International Journal of Greenhouse Gas Control,* 5, 5, p. 1220-1231. doi : 10.1016/j.ijggc.2011.06.004

Laude, A. (2020) « Bioenergy with carbon capture and storage : are short-term issues set aside ? », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 25, 2, p. 185-203. doi : 10.1007/s11027-019-09856-7

Marty, N. ; Hamm, V. ; Castillo, C. ; Thiéry, D. ; Kervévan, C. (2020) « Modelling water-rock interactions due to long-term cooled-brine reinjection in the Dogger carbonate aquifer (Paris basin) based on in-situ geothermal well data », *Geothermics*, 88, 20, 101899. doi : 10.1016/j.geothermics.2020.101899

Ministère chargé de l'Industrie (2023) « Point d'étape de la planification écologique de l'industrie ». Avril 2023.

Oke, K. ; Dees, J. ; Goldstein, H. ; McCoy, S. ; Sanchez, D. ; Simon, A.J. (2022) « Emissions reduction pathways in ethanol mills : carbon capture and storage or electrification », *GHGT-16*, Lyon, France.

Rosa, L. ; Sanchez, D. ; Mazzotti, M. (2021) « Assessment of Carbon Dioxide Removal Potential *via* BECCS in a Carbon-Neutral Europe », *Energy and Environmental Science,* 14, 5, p. 3086-97. doi : 10.1039/d1ee00642h

Royer-Adnot, J. ; Le Gallo, Y. (2017) « Economic Analysis of combined geothermal and CO2 storage for small-size emiters », *Energy Procedia*, 114, p. 7118-7125. doi : 10.1016/j.egypro.2017.03.1853

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502

Vaughan, N. ; Gough, C. (2016) « Expert assessment concludes negative emissions scenarios may not deliver », *Environmental Research Letters*, 11, 9. doi :10.1088/1748-9326/11/9/095003

Waller, L. ; Rayner, T. ; Chilvers, J. (2023) « Searching for a public in controversies over carbon dioxyde removal : an issue mapping study on BECCS and afforestation », *Science, Technology and Human Values*, 48, 1, p. 34-67. doi : 10.1177/0162243921104356

Wang, N. ; Akimoto, K. ; Nemet, G. (2021) « What went wrong ? Learning from three decades of carbon capture, utilization and sequestration (CCUS) pilot and demonstration projects », *Energy Policy*, 158,112546. doi : 10.1016/j.enpol.2021.112546

Published in : VIVIEN, Franck-Dominique ; THURIOT, Fabrice ; BOST, François ; LAQUERRIERE-LACROIX, Aude ; SALEMBIER, Pascal (dir.), *Regards interdisciplinaires sur l'étude et l'enseignement de la transition écologique. Actes du colloque de 2023, Université de Reims Champagne-Ardenne*, Editions des archives contemporaines, ISBN : 9782813005502, doi : 10.17184/eac.9782813005502