

VALORISATION CHIMIQUE DU CO₂

ETAT DES LIEUX

QUANTIFICATION DES BENEFICES ENERGETIQUES ET
ENVIRONNEMENTAUX ET EVALUATION ECONOMIQUE DE TROIS
VOIES CHIMIQUES

Juillet 2014

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par

ENEA Consulting et EReIE

avec le soutien de l'ICPEES (Université de Strasbourg)

Coordination technique : Aïcha El Khamlichi et Nathalie Thybaud – Service Recherche et
Technologies Avancées – Direction Recherche et Prospective – ADEME



SYNTHESE

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée sous la supervision de l'ADEME et avec la participation active d'acteurs français référents sur le sujet, tant dans l'administration que le secteur de la recherche et l'industrie :

- ADEME
 - Aicha El Khamlichi, Direction Recherche & Prospective / Service Recherche et Technologies Avancées (SRTA) / CSCV, en charge du suivi de la mission
 - Nathalie Thybaud, Direction Recherche & Prospective / Service Recherche et Technologies Avancées (SRTA) / Coordinatrice du pôle Technologies Avancées et Investissements d'avenir
- Direction Générale de l'Environnement et du Climat, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie : Christian Oeser, Chargé de mission pour le développement industriel, CCS & Géothermie
- IFPEN : Laurent Forti, Direction Scientifique, Responsable de programmes R&D
- LAFARGE : Michel Gimenez, Directeur Projets CO₂
- SOLVAY : David Savary, Essential chemicals, Ingénieur R&D Business
- Université Pierre & Marie Curie / Chimie Paris : Jacques Amouroux, Professeur émérite

Les auteurs tiennent également à remercier l'ensemble des personnes interviewées dans le cadre de cette étude, notamment Gérard Mignani, Vice-président Recherche et Innovation du groupe Solvay, pour ses éclairages précieux en matière de synthèse organique.

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

A PROPOS D'ENEA CONSULTING

ENEA Consulting est une société de conseil de 25 personnes, spécialisée sur la transition énergétique et le développement durable.

ENEA accompagne les leaders de l'industrie, les institutionnels, les investisseurs, les équipementiers et les entrepreneurs, en France et dans le monde. ENEA intervient en conseil stratégique, en conseil à l'innovation, en accompagnement aux projets ainsi qu'en tant qu'expert sur ses sujets : énergies renouvelables, stockage d'énergie, captage et valorisation du CO₂, efficacité énergétique, hydrogène, accès à l'énergie et bioénergies.

Depuis 2007, ENEA œuvre également pour l'accès à l'énergie dans le monde, via des missions d'accompagnement pro bono au profit d'acteurs sociaux (2000 jours de conseil, 50 missions, 20 pays, 15 études en diffusion libre). Au-delà d'un engagement éthique et d'un souhait de contribuer au développement, ce modèle créé du sens et de la valeur, force à l'innovation et fédère les équipes.

Auteurs :

Guillaume KERLERO de ROSBO – Chef de projet, ENEA Consulting

Loïc RAKOTOJAONA – Consultant, ENEA Consulting

Jacques de BUCY – Consultant, ENEA Consulting

Contributeurs :

Denis CLODIC – Président et Directeur R&D, EReE

Anne-Cécile ROGER – Professeur, Institut de Chimie et Procédés pour l'Énergie, l'Environnement et la Santé (ICPEES), CNRS & École de chimie, polymère et matériaux de Strasbourg

SYNTHESE

La lutte contre le réchauffement climatique s'est concrétisée en Europe et en France par des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Paquet Energie Climat, Objectif 3x20, Facteur 4). Différentes solutions techniques existent pour traiter les différentes sources d'émission, notamment de CO₂. Certaines, inéluctables à court terme, peuvent être traitées par le captage du CO₂ afin d'éviter leur émission directe à l'atmosphère. Ce CO₂ doit ensuite être géré et son stockage géologique semble aujourd'hui être le seul moyen de faire face aux importants volumes en jeu. Néanmoins, cette solution se heurte à d'importants défis de rentabilité économique et d'acceptation sociétale et ce dans un contexte politique international de plus en plus incertain en matière de lutte contre le changement climatique.

Des voies alternatives, consistant à utiliser le CO₂ au lieu de le stocker, existent et suscitent un intérêt croissant. L'utilisation de CO₂ dans un contexte industriel n'est pas nouvelle, certaines applications étant déjà commerciales depuis les années 70, comme la Récupération Assistée d'Hydrocarbures (RAH ou EOR pour Enhanced Oil Recovery : 50 MtCO₂/an) ou la production d'urée comme fertilisant agricole à partir du CO₂ issu de la fabrication d'ammoniac (107 MtCO₂/an). Les volumes aujourd'hui valorisés commercialement le sont généralement à partir de CO₂ naturel (80 % du CO₂ utilisé pour l'EOR) ou captif (i.e. inhérent au procédé, comme pour la production d'urée). Plusieurs facteurs expliquent toutefois l'intérêt croissant porté aux filières de valorisation du CO₂ industriel. Les principaux arguments avancés sont les suivants :

- Le développement de ces filières contribuerait à valoriser économiquement une partie du CO₂ capté et ainsi améliorer le bilan économique des projets de Captage, Transport et Stockage du CO₂ (CTSC) en cas de couplage avec ces derniers.
- Inscrites dans une logique d'économie circulaire car permettant la production de produits valorisables à partir d'un « déchet » industriel, elles pourraient également améliorer l'image de la filière CTSC.
- Adossées à des énergies décarbonées, ces voies permettraient tout de même de diminuer les émissions globales de CO₂ en produisant des carburants non fossiles ou en se substituant à des procédés consommant des ressources fossiles. Ces possibilités ont également des implications en matière d'indépendance énergétique.
- Le CO₂, abondant et non toxique, pourrait dans certains cas remplacer certains réactifs traditionnels sujets à des problématiques de santé et d'environnement liées à leur forte toxicité, comme le phosgène ou les isocyanates.

La présente étude, qui fait suite à une première étude commanditée par l'ADEME en 2011, s'intéresse plus précisément à l'utilisation du CO₂ comme réactif chimique. La valorisation directe du CO₂ (boissons gazeuses, glace carbonique, utilisation comme solvant, etc.), ainsi que les voies de valorisation biologiques (notamment la production de micro-algues qui fait l'objet d'une étude ADEME dédiée) ne sont par conséquent pas considérées ici. De même, la production de méthane à partir de CO₂ (ou méthanation), voie de valorisation chimique faisant elle aussi l'objet d'une étude ADEME ad hoc, est exclue du périmètre d'analyse.

L'objectif de cette étude est de faire le point sur les technologies de valorisation chimique du CO₂ afin d'avoir une meilleure visibilité sur leur potentiel de développement à horizon 2030 et sur les actions à mettre en œuvre au niveau français pour en favoriser l'émergence. Pour cela, cette étude s'articule autour de deux axes principaux :

- **La revue et caractérisation des principales routes chimiques de valorisation du CO₂** pour la synthèse de produits chimiques de base, produits énergétiques et matériaux inertes. Cet état des lieux inclut une présentation des grands principes sous-tendant les voies étudiées, une évaluation préliminaire de leurs performances, avantages et inconvénients, une liste des principaux projets de R&D en cours, un focus sur les projets emblématiques ainsi qu'une analyse synthétique du marché des principaux produits qui en sont issus.
- Sur la base de ces éléments, **la sélection de 3 routes parmi les plus prometteuses à horizon 2030 pour une analyse approfondie**. Ce second volet a consisté à modéliser les procédés en question afin d'évaluer plus finement leurs performances énergétiques, environnementales et économiques, puis de comparer ces performances, tant entre les procédés que vis-à-vis des voies pétrochimiques conventionnelles. Les objectifs de la modélisation ne sont par conséquent ni de construire un outil de dimensionnement des procédés, ni de dire si une technologie sera compétitive à 2030, mais bien d'analyser dans quelles conditions elle pourrait l'être.

Entre filières technologiques et routes chimiques : périmètre d'analyse

En matière d'utilisation du CO₂ comme réactif chimique, le champ des possibles est vaste. Le principe général consiste à synthétiser des molécules à valeur ajoutée (hydrocarbures ou autres molécules généralement dérivées des hydrocarbures fossiles par pétrochimie) en partant d'une molécule thermodynamiquement très stable.

Les différentes possibilités de valorisation chimique du CO₂ peuvent être segmentées par type de produits – carburants, produits chimiques, matériaux de construction – ou bien par « **filière technologique** ». Par soucis de cohérence avec la précédente étude « Panorama des voies de valorisation du CO₂ » et dans une optique d'appui au développement de filières industrielles, une nomenclature par filière technologique a été ici utilisée. Ces filières sont au nombre de sept :

- Synthèse organique
- Hydrogénation
- Minéralisation ex-situ
- Reformage sec
- Électrolyse ou électro-réduction
- Photoélectrocatalyse
- Thermochimie

Pour convertir le CO₂ en une autre molécule, ces différentes familles technologiques font appel à deux principes réactionnels de base (cf. Figure 1) :

- **La fonctionnalisation du CO₂ par ajout de nouvelles liaisons covalentes.** Ce principe régit notamment les procédés de synthèse organique et de minéralisation, et conduit à la formation d'une large gamme de molécules utilisées essentiellement dans le secteur de la chimie.
- **La réduction du CO₂ vers des états plus riches en énergie.** Ce principe supporte la plupart des autres familles technologiques, généralement à des fins énergétiques. Au sein de cette seconde catégorie, certains procédés conduisent directement à la formation de molécules d'intérêt tandis que d'autres s'arrêtent à la synthèse de monoxyde de carbone (CO) et, par ajout d'hydrogène, de gaz de synthèse (syngaz) pouvant être ensuite converti en méthanol ou carburants de synthèse.

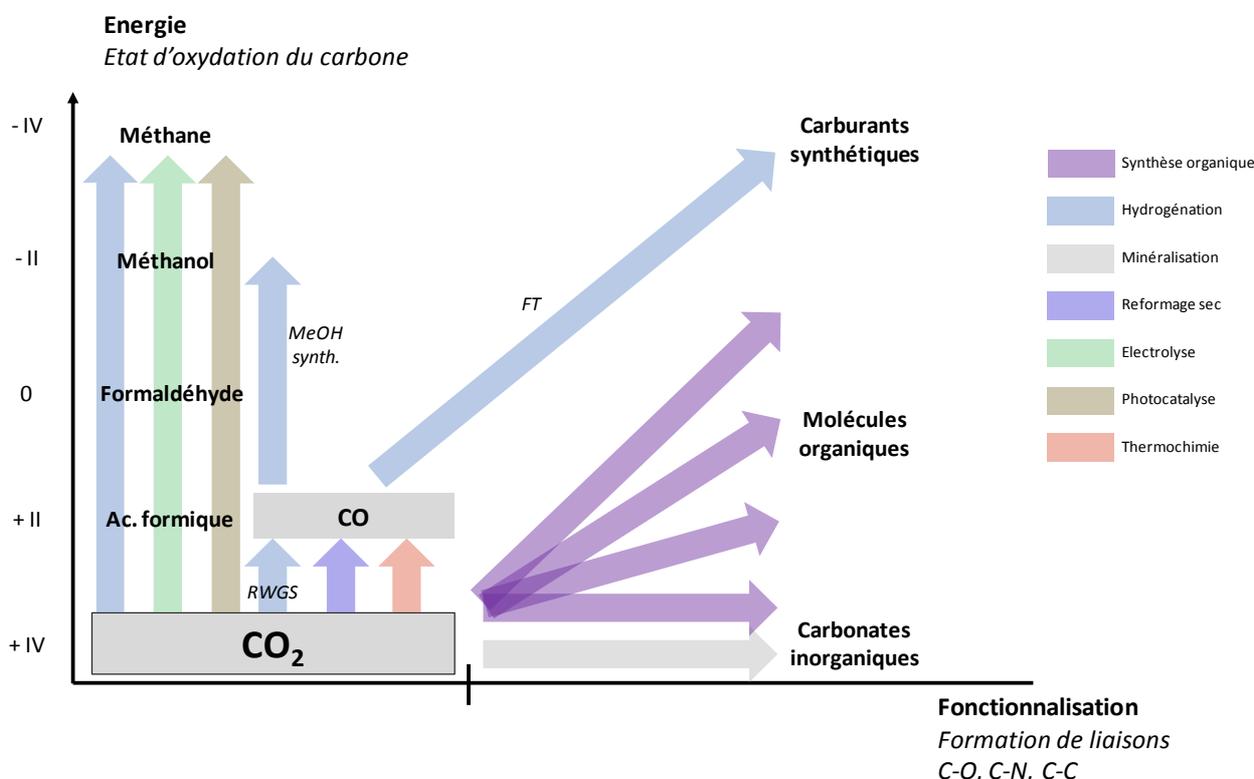


Figure 1 – Principe chimique et énergétique des différentes filières technologiques de valorisation chimique du CO₂

RWGS : Reverse Water Gas Shift ; FT : Fischer-Tropsch ; MeOH synth. : synthèse de méthanol

Quel que soit le principe sur lequel la réaction de valorisation chimique du CO₂ repose, un apport d'énergie est nécessaire. Selon les familles technologiques, la source de cette énergie diffère, comme illustré en Figure 2 (les sources facultatives sont indiquées en pointillés).

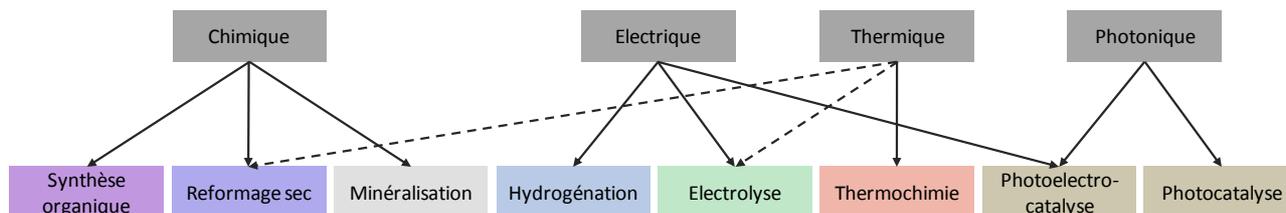


Figure 2 – Source d'énergie utilisée dans les différents procédés de valorisation chimique du CO₂¹

Les familles technologiques reposant sur une fonctionnalisation du CO₂ bénéficient de l'énergie apportée par les autres réactifs, généralement en intégrant la molécule de CO₂ à une autre molécule, et nécessitent en moyenne un moindre apport d'énergie extérieure que les réactions de réduction qui nécessitent quant à elles de casser des liaisons C-O. Suivant les technologies, l'énergie nécessaire à cette réduction peut-être d'origine électrique, thermique ou photonique (utilisation directe de la lumière du soleil). L'énergie électrique et thermique représentée ici peut être d'origine renouvelable ou non, bien que l'utilisation d'énergie décarbonée soit généralement une condition *sine qua non* à un bilan CO₂ favorable.

Les familles technologiques ainsi définies et utilisées dans de nombreux états de l'art sont larges et incluent parfois un nombre important de réactions chimiques à des niveaux de maturité et de performance très différents. Chaque famille technologique regroupe en fait plusieurs « routes chimiques », qu'il est nécessaire de considérer de façon différenciée pour répondre aux objectifs de l'étude. Une route chimique désigne la combinaison d'une réaction chimique et d'un procédé la réalisant, par exemple : production de méthanol par hydrogénation du CO₂, production d'acide formique par électrolyse du CO₂, etc.

Au final, une trentaine de routes chimiques, toutes filières technologiques confondues, ont été considérées dans cette étude et successivement sélectionnées pour approfondissement, comme indiqué sur la Figure 3.

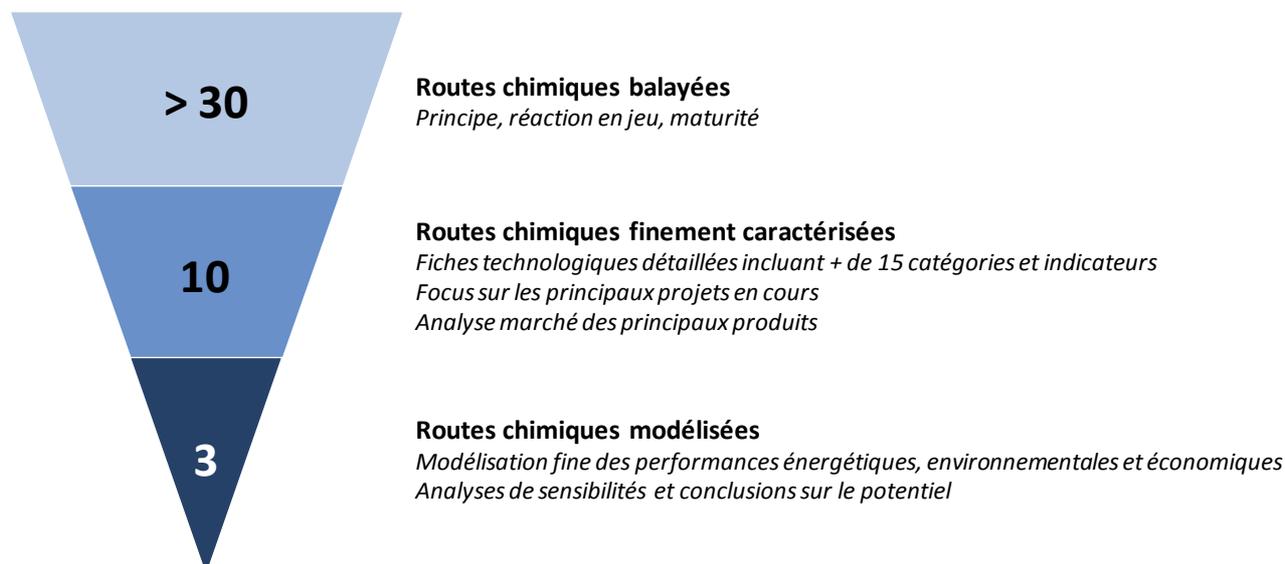


Figure 3 – Processus de caractérisation et sélection des différentes voies de valorisation chimique du CO₂

¹ Dans le cas de l'hydrogénation, l'énergie apportée est stricto sensu d'ordre chimique (énergie contenue dans l'hydrogène), toutefois, cette voie étant utilisée à des fins essentiellement énergétiques, elle n'a de sens qu'en utilisant de l'hydrogène « décarboné » c'est-à-dire produit par électrolyse (fonctionnant sur une base la plus renouvelable possible) plutôt que par reformage de méthane. La source d'énergie nécessaire à l'hydrogénation est donc ici électrique.

Synthèse comparative des routes chimiques caractérisées

Plusieurs critères d'évaluation ont été utilisés pour comparer les routes chimiques entre elles. Les critères principaux, utilisés pour prioriser les routes à étudier en phase 2, sont les suivants :

- La maturité technologique des procédés, i.e. la maturité et l'échelle actuelle des projets les plus avancés, et le temps estimé pour atteindre une maturité technologique commerciale
- Le potentiel de la route considérée en termes de valorisation du CO₂, tant vis-à-vis des volumes de CO₂ théoriquement valorisables que de la durée de mobilisation de ce CO₂ dans les produits formés
- La taille du marché et la valeur ajoutée des produits formés, donnant accès à une valeur du marché total du produit. Ces éléments de marché incluent une indication sur la « valeur ajoutée potentielle du produit à base de CO₂ », i.e une estimation qualitative du caractère différenciant ou non d'un produit « vert » ou « décarboné » par rapport à un produit conventionnel
- Les conditions opératoires et la performance énergétique de différentes routes chimiques (premières indications de rendement, intensité et coût énergétique)
- Le savoir-faire français : estimation qualitative reflétant l'intensité relative du positionnement actuel des acteurs français sur les différentes routes chimiques (existence de projets français visibles, etc.)

Ce premier niveau de comparaison est synthétisé en Figure 4.



	Synthèse de polycarbonates polyols	Synthèse de méthanol par hydrogénation directe	Synthèse de méthanol par hydrogénation indirecte	Synthèse de carburants par hydrogénation indirecte	Synthèse de carbonates inorganiques par minéralisation	Concrete curing	Reformage sec	Synthèse d'acide formique par électrolyse à T ambiante	Photocatalyse & Photoelectrocatalyse	Synthèse de syngaz par thermochimie	
Maturité technologique	D	D	L-P	L-P	D	P-D	P	L-P	L	P	D : démonstration P : pilote L : laboratoire
Temps avant maturité technologique commerciale (années)	5*	5*	8-10	8-10	>10	5*-10	<10	>10	>10	<10	* Pour les premières applications
Potentiel CO ₂ théorique (tonnage annuel)	Mt	x10 Mt	Gt	Mt	x100 Mt		x100 kt	Gt	Gt		Ordre de grandeur
Durée de mobilisation du CO ₂	A	S-M	S-M	Dec	Dec	S-M	S-M	S-M	S-M		S : semaines M : mois A : années Dec : décennies et +
Valeur du marché total du produit (€/an)	x10 Mds	Mds	x100 Mds	x10 Mds	x100 Mds	x100 Mds	<100 M	x100 Mds	x100 Mds		
Valeur ajoutée potentielle du produit à base de CO ₂											
Intensité énergétique / Coût énergétique											
Savoir-faire français											

Figure 4 – Récapitulatif synthétique des performances des différentes voies de valorisation chimique du CO₂²

² Les couleurs verte, orange et rouge indiquent, de manière qualitative et comparative, un niveau de performance élevé, moyen et faible des technologies les unes par rapport aux autres sur un critère donné. La couleur grise est utilisée en cas d'absence d'information. Pour les critères ayant fait l'objet des différents graphiques de synthèse présentés dans les paragraphes précédents, ce code couleur est accompagné d'ordres de grandeur quantitatifs.

Au vu de cette comparaison multicritères, il apparaît qu'aucune solution n'est parfaite et qu'aucune voie ne prend l'ascendant de façon claire et naturelle sur les autres ; suivant l'angle d'approche adopté et les critères privilégiés, la hiérarchie des voies varie de façon substantielle.

Pour aller plus loin et espérer faire ressortir certaines voies, il est à la fois possible de croiser certains indicateurs pour répondre à des questions précises, et il est nécessaire de préciser les questions auxquelles on souhaite répondre. Par exemple, si l'on cherche avant tout des solutions pouvant théoriquement valoriser les plus grands volumes de CO₂ et ce à une échéance la plus proche possible, il faut croiser les indicateurs « potentiel théorique de valorisation de CO₂ » et « niveau de maturité technologique ». Si l'on souhaite privilégier les solutions les plus susceptibles d'apporter de l'activité économique à la France, il peut s'avérer pertinent de croiser « valeur globale du marché des produits » et « savoir-faire des acteurs français ». Ce nouvel indicateur, couplé à la maturité, donne ensuite une première estimation des routes les plus susceptibles de générer une activité économique française à l'échéance temporelle la plus proche possible. Enfin, si l'enjeu est d'estimer les voies de valorisation qui ont le plus de sens au niveau énergétique, les premiers calculs de rendement et de coût énergétique sont à privilégier.

Au final, au vu de l'ensemble de ce travail préliminaire d'évaluation, les trois voies de valorisation chimique du CO₂ sélectionnées pour une modélisation plus fine sont les suivantes :

- **La synthèse de méthanol par hydrogénation directe**
- **La synthèse de carbonate de sodium par minéralisation en voie aqueuse**
- **La synthèse d'acide formique par électro-réduction**

Cette sélection a en outre l'avantage de présenter :

- Un équilibre entre solutions à visée énergétique et solutions à visée non-énergétique
- Trois filières technologiques sur lesquelles des acteurs français se positionnent

Conclusions issues de la modélisation

Les voies de valorisation chimique constituent-elles un levier intéressant de réduction des émissions de CO₂ ? A quel point les produits issus de ces procédés sont-ils décarbonés ? Les produits issus de ces procédés sont-ils compétitifs avec les produits issus des voies de production traditionnelles ? Si non, dans quelles conditions pourraient-ils le devenir ?

Pour apporter des réponses à ces questions, les modélisations effectuées incluent:

- La possibilité de sélectionner les principaux intrants des procédés parmi plusieurs sources possibles, qu'il s'agisse notamment de la source d'électricité (réseau, éolien terrestre, solaire photovoltaïque, combustion de biogaz issu de méthanisation) ou de la source de CO₂ (capté sur centrale charbon ou issu de l'épuration du biogaz en biométhane).
- La variation de l'ensemble des hypothèses de performance, à partir d'une valeur nominale, entre des bornes minimales et maximales. La sélection de l'ensemble des hypothèses les plus favorables permet ainsi de se projeter dans des situations futures couplant une amélioration des performances des procédés et des contextes projet favorables.
- Des analyses de sensibilité visant à identifier les paramètres les plus sensibles et la recherche de valeurs cibles.

Les résultats de cet exercice sont présentés ci-après.

Le CO₂ valorisé n'est pas le CO₂ évité

Contrairement aux chiffres annoncés dans beaucoup de publications, le CO₂ valorisé (entrant) dans un procédé n'est pas le CO₂ évité.

Sans même prendre en compte l'ensemble du cycle de vie (matériaux, construction, démantèlement, etc.), un procédé de valorisation consomme des intrants (CO₂, électricité, etc.) plus ou moins carbonés et qui se doivent d'être comptabilisés dans le bilan CO₂ du procédé.

En utilisant de l'électricité très peu carbonée (même d'un point de vue ACV) comme l'éolien ou le nucléaire, et du CO₂ fatal issu d'unités bioénergétiques comme les unités de production de biométhane, il est possible d'atteindre 99 % de CO₂ effectivement évité. Mais les 3 scénarios nominaux utilisant de l'électricité réseau et du CO₂ issu d'un captage sur centrale montrent respectivement, pour les trois technologies modélisées, des ratios CO₂ évité / CO₂ valorisé de 53 %, 62 %, et 67 %.

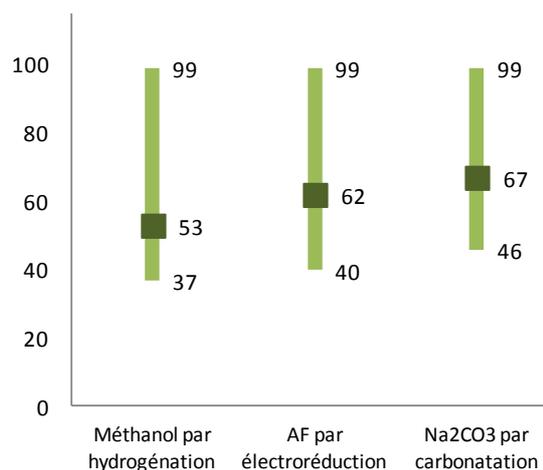


Figure 5 – Parts minimale, nominale et maximale de CO₂ réellement évité pour les 3 procédés modélisés, en %

Des produits décarbonés à substituer aux produits conventionnels

Les procédés modélisés ont donc des bilans CO₂ intrinsèques favorables et constituent effectivement des solutions de réduction des émissions de CO₂.

De plus, un produit issu de CO₂ sera substitué à un produit conventionnel, généralement d'origine pétrolière et possédant un fort contenu CO₂. La Figure 6 compare ces empreintes. En intégrant les gains induits par la non consommation du produit conventionnel, et selon les hypothèses prises sur ces derniers, les volumes de CO₂ évités sont de l'ordre de 1 à 4 t_{CO2}/t_{produit}.

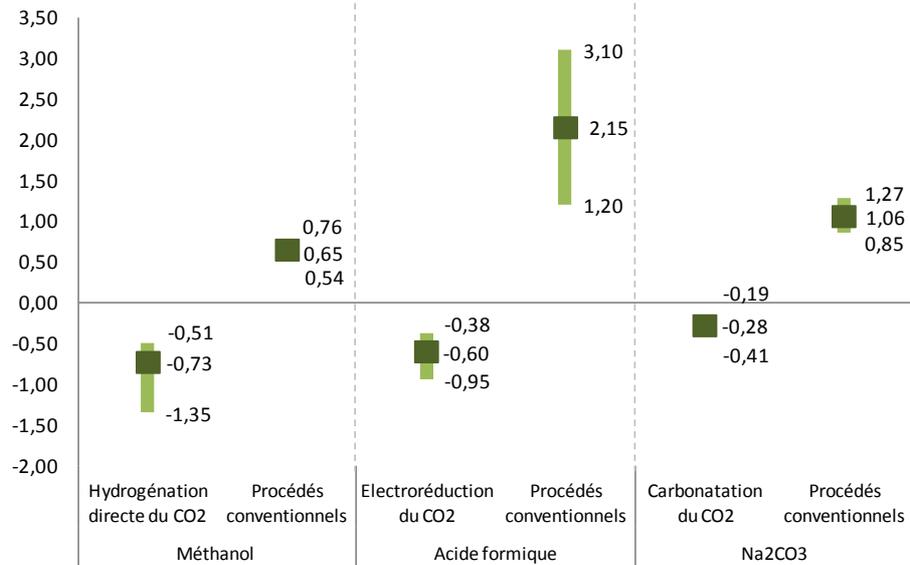


Figure 6 – Valeurs minimales, nominales et maximales de l'empreinte CO₂ des produits issus de CO₂ et issus de procédés conventionnels, en t_{CO2}/t_{produit}

Un impact climatique très limité

Si du CO₂ peut réellement être évité pour chaque tonne de produit générée par les procédés de valorisation chimique, les quantités de CO₂ annuellement évitées par une unité restent limitées à quelques milliers de tonnes de CO₂. Cet ordre de grandeur restera valable même en cas de montée d'échelle des unités commerciales par rapport aux unités actuelles.

Même une substitution totale du marché mondial de l'un ou l'autre des produits considérés ne permettrait de valoriser que quelques dizaines de Mt_{CO2} par an (contre ~ 4 Mt_{CO2} par an émises par une centrale à charbon de 500 MW), comme on peut le voir sur la Figure 7.

Même si cet exercice théorique pourrait donner des valeurs supérieures pour d'autres produits comme les carburants de synthèse, l'ordre de grandeur des débouchés CO₂ en questions n'est ainsi pas à la hauteur de l'enjeu climatique avec 32 Gt de CO₂ mondialement émises en 2011 [38] dont on estime qu'un peu plus de la moitié, 18,5 Gt/an de sources industrielles concentrées, pourraient être captées [2]. Les solutions de valorisation ne sont donc pas en mesure de remplacer le stockage géologique comme outil de réduction des émissions anthropiques et de lutte contre le changement climatique.

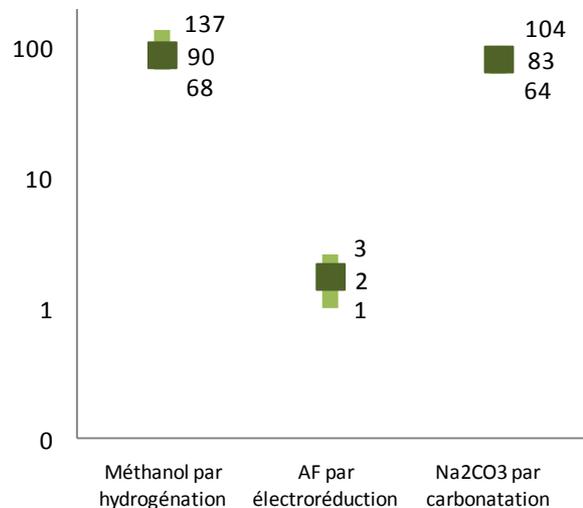


Figure 7 – Tonnage annuel minimal, nominal et maximal de CO₂ évité par la substitution de l'ensemble du marché mondial du produit pour les 3 procédés modélisés, en Mt_{CO2}/an (échelle logarithmique)

Une compétitivité économique difficile à trouver...

La question de la rentabilité des unités modélisées peut être adressée à travers l'analyse des coûts de production des produits issus de CO₂ et de leur comparaison avec les prix en vigueur sur le marché. Les résultats de cette analyse sont récapitulés en Figure 8.

Des trois procédés modélisés, seule la production d'acide formique présente des coûts de production comparables avec les prix de marché du produit et peut même, avec des hypothèses favorables, montrer une rentabilité intéressante. La production de méthanol par hydrogénation directe et la production de carbonate de sodium par minéralisation en voie aqueuse présentent, quant à elles, des coûts de production plusieurs fois au-dessus du prix de leur marché respectif, et ce même dans des configurations favorables.

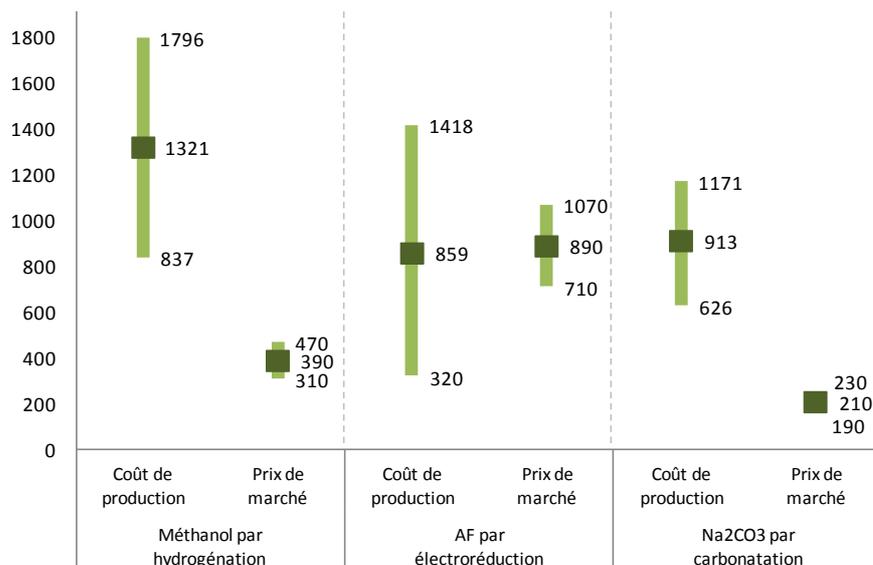


Figure 8 – Coût de production versus prix de marché actuel du produit pour les 3 procédés modélisés, en €/t_{produit}

La difficulté de ces nouvelles technologies à concurrencer les filières pétrolières traditionnelles est peu étonnante. Mais, comme conclu précédemment, chaque tonne de produit généré permet de ne pas émettre de CO₂. La principale question est donc de savoir, in fine, quelle valeur ou prix du CO₂ justifierait cet écart de coût de production. Ces valeurs sont récapitulées Figure 9 pour le scénario nominal, le scénario le plus optimiste et un scénario moins favorable³.

Si la production d'acide formique par électroréduction pourrait potentiellement s'avérer compétitive sans nécessiter la fixation d'un prix au CO₂, le prix du CO₂ devrait atteindre, au minimum, plus de 200 €/t pour permettre aux deux autres filières d'atteindre la rentabilité. Des niveaux difficilement envisageables à moyen terme. Sans cet équilibre, il sera difficile pour ces technologies d'émerger, et donc de constituer un relais de rentabilité pour les projets CTSC.

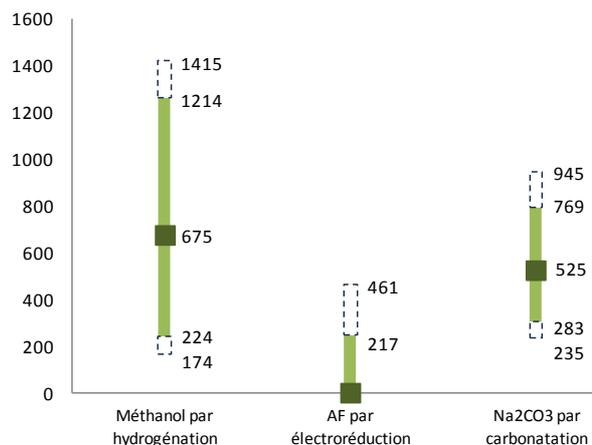


Figure 9 – Valeur du CO₂ justifiant la filière en équilibrant coûts de production et prix marché pour les 3 procédés, en €/t_{CO2}

D'un point de vue de la réduction des émissions anthropiques de CO₂, et au-delà du fait que la valorisation chimique du CO₂ présente un potentiel global de réduction des émissions limité, l'utilisation de ces technologies pour réduire les émissions de CO₂ s'avérerait relativement onéreuse. Les valeurs du CO₂ justifiant l'émergence de ces solutions présentées Figure 9 sont en effet à comparer avec les coûts des autres mesures de réduction des émissions. A titre d'exemple, les coûts d'une chaîne de captage, transport et stockage géologique du CO₂ (CTSC) sont estimés entre 90 et 200 €/t_{CO2} évitée pour les premières unités et susceptibles de descendre entre 50 et 150 €/t_{CO2} évitée à horizon 2030 [2][3]. Enfin, la mise en place effective d'un mécanisme fixant un prix du CO₂ (marché carbone, taxe, etc.) et

³ Les barres vertes sont calculées sur la base des valeurs nominales de prix marché et d'empreinte CO₂ du produit conventionnel. Les extensions en pointillé sont calculées sur la base des valeurs minimales et maximales de ces mêmes paramètres. Ainsi, 174 €/t_{CO2} pour la filière méthanol correspond au prix de marché le plus bas de la gamme retenue et à la valeur la plus élevée d'empreinte CO₂ de procédé conventionnel. Face aux incertitudes importantes sur ces données, on raisonne par la suite sur les valeurs nominales.

auquel les solutions de valorisation chimique du CO₂ seraient éligibles n'est pas acquise et sa faisabilité nécessiterait d'être approfondie, notamment du fait que le CO₂ n'est pas évité de façon permanente dans la plupart des cas.

Les performances technico-économiques des routes chimiques analysées sont bien sûr extrêmement dépendantes des hypothèses retenues pour leur modélisation. Par ailleurs, seules trois routes ont été modélisées parmi de nombreuses possibilités. Enfin, les hypothèses de référence retenues (prix de marché et empreinte CO₂ des procédés conventionnels) sont des hypothèses moyennes dont l'analyse, hors du périmètre de l'étude, pourrait être affinée. Toutefois, les larges gammes d'hypothèses testées ainsi que le soin apporté à la sélection et la priorisation des routes à modéliser nous permettent d'apporter des réponses avec une portée relativement générale sur les procédés chimiques de valorisation du CO₂.

L'amélioration des performances technico-économiques des procédés (e.g. amélioration des rendements et baisse des coûts d'investissement des électrolyseurs pour l'hydrogénation, baisse des coûts d'investissement et d'opération pour la synthèse de carbonate de sodium) est bien sûr susceptible de rendre les filières de valorisation chimique du CO₂ plus compétitives. Ainsi, la sélection des performances technico-économiques les plus favorables pour les technologies entraîne une baisse du prix seuil du CO₂ l'ordre de 30 %. L'atteinte de ces performances ne pourra se faire que moyennant des efforts R&D importants.

Toutefois, les progrès technologiques, quels qu'ils soient, ne suffiront sans doute pas à assurer la rentabilité de plusieurs des routes chimiques, même à moyen-long terme, du fait du poids important de l'approvisionnement électrique dans les coûts complets (plus de 50 % pour la production de méthanol par hydrogénation). Le CO₂ est une molécule stable et peu réactive ; une quantité importante d'énergie est nécessaire, d'autant plus quand l'on vise des produits à haut niveau d'énergie (des carburants, typiquement).

La pénétration croissante des énergies renouvelables intermittentes implique certes une baisse des prix sur le marché et donc une baisse des coûts de fourniture en électricité, jusqu'à un coût potentiellement nul pour un certain nombre d'heures dans l'année mais il est important de garder à l'esprit que la fourniture ne représente en moyenne que 40 % environ de la facture électrique des industries. Sauf modification structurelle des modalités de tarification de l'électricité, les usines de valorisation du CO₂ connectées au réseau devront s'acquitter de frais d'utilisation de ce réseau (TURPE) ainsi que de la CSPE⁴, rendant relativement illusoire la perspective d'un approvisionnement en électricité à très bas prix. L'impact combiné du TURPE et de la CSPE est estimé à 36 €/MWh_e aujourd'hui, chiffre amené à croître avec la pénétration des renouvelables et la hausse de la CSPE qui en découlerait.

Enfin, le CO₂ entrant peut finalement s'avérer relativement coûteux à acquérir et doté d'une empreinte CO₂ non nulle. L'utilisation d'un CO₂ capté sur une centrale thermique, par exemple, rend difficile l'atteinte de conditions favorables à l'émergence de plusieurs solutions (responsable de 100 €/t_{CO2} dans le calcul du prix CO₂ seuil pour le méthanol et de 30 €/t_{CO2} pour le carbonate de sodium). L'utilisation d'un CO₂ issu de l'épuration du biogaz en biométhane, en tant que co-produit fatal et donc à fois gratuit et décarboné, constituera dans certains cas la seule source de CO₂ viable, et sur des volumes plus cohérents avec les besoins des unités de valorisation qu'une centrale thermique⁵. Également dans une optique de réduction du coût d'acquisition du CO₂, les procédés les moins exigeants en termes de pureté du CO₂ entrant seront à privilégier pour limiter les coûts de purification associés.

La Figure 10 synthétise ces réflexions en fournissant, pour la synthèse de méthanol par hydrogénation directe, la valeur nominale du prix du CO₂ équilibrant coûts de production et valeur marché, ainsi que les gains obtenus en actionnant les différents leviers cités : performances technologiques les plus optimistes (e.g. hausse des rendements des électrolyseurs et baisse des CAPEX des équipements pour l'hydrogénation, baisse des coûts d'investissement et d'opération pour la minéralisation), utilisation d'un CO₂ entrant gratuit et décarboné, projection dans un mix énergétique à 2030 très riche en énergies renouvelables⁶ et enfin suppression des taxes. La Figure 11 fournit des résultats similaires pour la synthèse de carbonate de sodium par minéralisation.

⁴ La structure du TURPE comme de la CSPE a tendance à pénaliser les petites unités : une montée d'échelle importante mais peu crédible à court terme, permettrait de limiter (relativement) l'impact de ces deux postes de coût.

⁵ Une unité moyenne d'injection produisant 150 Nm³/h de biométhane produira environ 1200 t_{CO2}/an, ce qui est un ordre de grandeur cohérent avec les besoins des unités modélisées pour le méthanol et l'acide formique par exemple

⁶ Le scénario « ADEME 2030 » a été construit dans le cadre de l'étude PEPS sur le potentiel national du stockage d'énergie, sur la base de la vision ADEME 2030 : 40 % de la production électrique générée à partir d'énergies renouvelables intermittentes, -20 % de la consommation annuelle française à travers une forte maîtrise de la demande. Pour

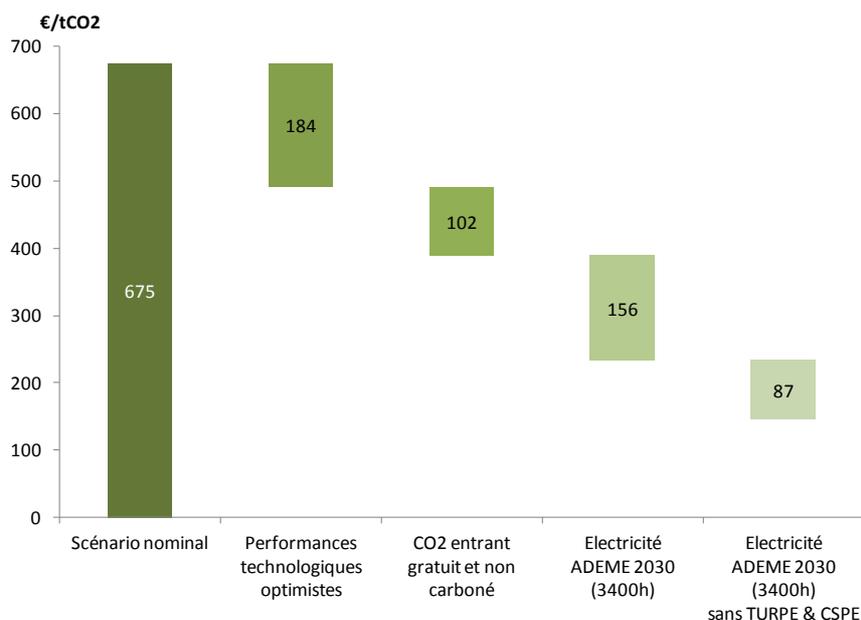


Figure 10 – Prix du CO₂ nécessaire à la rentabilité d'une unité de production de méthanol par hydrogénation directe dans le scénario nominal et selon différents scénarios de réduction des coûts

Ainsi, même dans un mix énergétique très riche en énergies renouvelables permettant aux installations de bénéficier d'un grand nombre d'heures à très bas coût de fourniture, la rentabilité de certaines solutions restera difficile à trouver. Cela est d'autant plus vrai pour les technologies pour lesquelles l'approvisionnement en électricité représente une part inférieure du coût de production, comme la synthèse de carbonate de sodium, moins sensible à ces considérations comme on peut le voir sur la Figure 11.

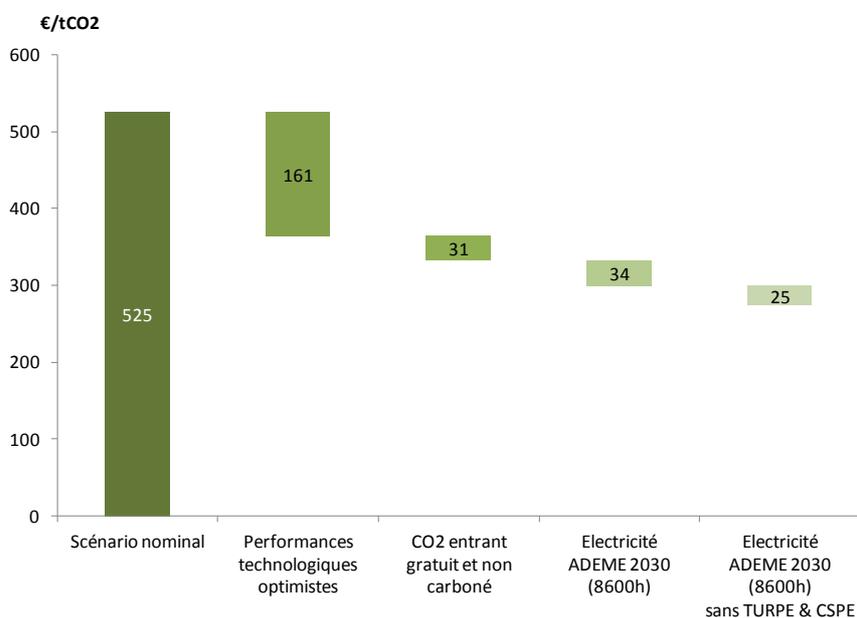


Figure 11 – Prix du CO₂ nécessaire à la rentabilité d'une unité de production de carbonate de sodium par minéralisation dans le scénario nominal et selon différents scénarios de réduction des coûts

Ainsi, il semble pertinent de privilégier les routes de valorisation du CO₂ délivrant des produits à faible niveau énergétique et à prix de marché élevé, tout en ayant conscience que ces choix se font généralement au détriment de l'impact CO₂, vu la taille plus limitée des marchés concernés. C'est le cas de l'acide formique, par exemple, dont la synthèse

plus de détails, voir [116]. Toujours dans une recherche de conditions les plus favorables possibles, on considère dans un premier temps que les taxes appliquées à ce scénario sont celles d'aujourd'hui (en réalité, leur tendance est plutôt à la hausse et une pénétration accrue des énergies renouvelables intermittentes s'accompagnerait vraisemblablement d'une hausse de la CSPE et du TURPE).

nécessite un faible apport en énergie et est à haute valeur ajoutée. Les voies de synthèse organique, privilégiant une fonctionnalisation du CO₂ plutôt que sa pure réduction vers des états plus riches en énergie, et bénéficiant de l'énergie contenue dans les autres réactifs, représentent à ce titre une piste de travail intéressante. Les produits dont les procédés conventionnels de production sont particulièrement émetteurs sont également à privilégier.

Enfin, d'éventuels services connexes apportés par les technologies de valorisation du CO₂ (remplacement de réactifs toxiques, gains en matière d'indépendance énergétique, etc.) pourront dans certains cas venir moduler la vision technico-économique adoptée dans cette étude.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr