

ADEME RECHERCHE

#34 AVRIL 2021



SOMMAIRE

Exposé

DE LA RECHERCHE
DE L'EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE À
LA DÉCARBONATION

2

Résultats
significatifs
DÉCARBONATION :
LES SOLUTIONS
À L'ŒUVRE

3

Rencontre
« DÉVELOPPER
DES SOLUTIONS
PERFORMANTES SUR
UN PLAN TECHNIQUE,
MAIS AUSSI
ÉCONOMIQUE »

5



L'ÉDITO

David Marchal

Directeur exécutif adjoint de l'Expertise
et des Programmes à l'ADEME

L'industrie, qui représente environ 20 % des émissions de gaz à effet de serre de la France, constitue un enjeu important de la transition écologique et énergétique. Dans la perspective des 80 % de réduction des émissions industrielles à horizon 2050 inscrits dans la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), les industriels doivent « décarboner » leurs activités. Conscient de cet enjeu, le Plan de relance consacre 30 milliards à la transition écologique, dont une partie doit contribuer à pérenniser et à moderniser le tissu industriel français. La recherche et l'innovation sont indispensables pour réduire les consommations énergétiques des procédés et développer de nouvelles solutions bas carbone. Dans ce cadre, l'ADEME travaille à construire des visions sectorielles partagées avec les

« La recherche et l'innovation sont indispensables pour réduire les consommations énergétiques des procédés et développer de nouvelles solutions bas carbone. »

acteurs et à soutenir l'innovation. Cette lettre ADEME Recherche accompagne le congrès sur l'innovation et l'efficacité énergétique pour la décarbonation de l'industrie organisé par l'Alliance Industrielle pour la Compétitivité et l'Efficacité Énergétique (ALLICE), reporté aux 21 et 22 septembre 2021. Nous vous donnons rendez-vous pour ces journées d'échanges destinées à construire une vision commune des enjeux de la décarbonation de l'industrie et à présenter un panorama de solutions innovantes pour y parvenir. •

DE LA RECHERCHE DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE À LA DÉCARBONATION

Dans la perspective des 80 % de réduction des émissions industrielles à l'horizon 2050 inscrits dans la Stratégie nationale bas carbone (SNBC), l'innovation et le développement de procédés de rupture sont indispensables. Retour sur 10 années de recherche accompagnées par l'ADEME.

En France, l'industrie contribue à une consommation substantielle d'énergie : un quart de la consommation finale nationale d'énergie, un tiers de la consommation d'électricité. L'industrie écono-intensive représente 3 % des entreprises de plus de 20 salariés. Elle est responsable de plus de 70 % de la consommation totale d'énergie de l'industrie... et de plus de 75 % des émissions de gaz à effet de serre (GES). La maîtrise des consommations et l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie représentent donc des enjeux majeurs. L'ADEME a donc mis en place dès 2009 une collaboration avec l'entreprise Total sur un programme de recherche et d'innovation pour l'efficacité énergétique dans l'industrie. Elle a ensuite lancé l'appel à projets de recherche Énergie Durable et ouvert la voie à l'intégration de la thématique dans le dispositif des investissements d'avenir. Objectifs : favoriser les mécanismes de l'émergence de nouvelles technologies moins énergivores, en particulier en identifiant les besoins et les verrous des différents acteurs en termes de Recherche & Développement, et tester de nouvelles solutions.

ADEME TOTAL : LE PREMIER PROGRAMME EN FAVEUR DE L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Le programme ADEME Total a été construit avec l'objectif de faire émerger des démonstrateurs de procédés transverses dans le cadre d'un partenariat public-privé. À travers huit appels à manifestation d'intérêt (AMI), le programme a permis la réalisation de 55 projets, sur un total de 163 dossiers reçus en 5 ans, entre 2009 et 2013. 15 projets (soit 47 % de l'aide totale du programme) ont porté sur l'efficacité énergétique des procédés : les sécheurs, les cycles ORC¹ et les échangeurs thermiques. Ce programme a permis à huit démonstrateurs d'innovations technologiques de trouver leur marché et à sept autres projets de gagner suffisamment en maturité pour être sélectionnés ensuite dans le cadre des démonstrateurs soutenus au travers des investissements d'avenir. Avant la fin du programme ADEME Total, se sont ouvertes deux voies pour amplifier le soutien à l'innovation selon le degré de maturité des projets. L'appel à projets Énergie Durable, à travers ses éditions de 2015 à 2020, soutient l'émergence de technologies. Des technologies plus matures ont pu être accompagnées vers la mise sur le marché via des dispositifs des investissements destinés aux démonstrateurs de solutions pour des énergies décarbonées.

APRED : 5 ÉDITIONS POUR ENTRAÎNER LES INDUSTRIELS VERS LA DÉCARBONATION

Les premières éditions (2016 et 2017) visaient des industries ou des technologies très consommatrices d'énergie. Les recherches ont ainsi porté sur l'amélioration des performances énergétique des technologies (moteurs, groupe froid, chaudière, fours, séchoirs, évaporateurs, échangeurs de chaleur, etc.), la récupération de chaleur fatale, la production de froid innovante, ou encore le développement des technologies de stockage thermique. À cette logique d'aide aux briques technologiques s'est progressivement ajoutée une approche systémique basée sur l'optimisation des systèmes, l'intégration des différentes sources d'énergie et leurs régulations (éditions 2017 et 2018). Depuis l'édition 2020, l'APRED vise l'atteinte d'un objectif de plus long terme : la décarbonation de l'industrie lourde. En parallèle, l'ADEME a renforcé son soutien, au travers de sa participation à l'ERANET ACT, aux projets de captage, stockage et valorisation du CO₂.

AUTRES DISPOSITIFS DE SOUTIEN À L'INNOVATION

De nombreux dispositifs de soutien à l'innovation se sont enchaînés ces huit dernières années dans le cadre du Programme des Investissements d'Avenir opéré par l'ADEME. Citons notamment les appels IPME Efficacité énergétique et ressources dans le bâtiment, l'industrie et l'agriculture (2017), le Concours d'innovation Industrie, agriculture et sylviculture éco-efficientes (2018), l'AAP Industrie éco-efficiente et le concours d'innovation Efficacité en énergie et en ressources (2019), le concours d'innovation Industrie et agriculture éco-efficientes et enfin l'AAP Économie circulaire –Eco-efficience dans l'industrie, l'agriculture et l'eau qui s'est clôturé le 20 janvier 2021. Le PIA opéré par l'ADEME² a déjà permis de soutenir 36 projets d'efficacité énergétique et 13 projets sur la décarbonation des procédés. En 2020, la décarbonation de l'industrie est identifiée comme un marché clé et fait l'objet, dans le cadre du plan de relance, d'une stratégie spécifique dans laquelle l'ADEME valorise les travaux de recherche et d'innovation qu'elle a soutenus. •

1. Le principe d'une machine ORC est de transformer la chaleur émise par un moteur en énergie utile via un fluide de travail.

2. www.ademe.fr/bilan-thematique-industrie-eco-efficient

DÉCARBONATION : LES SOLUTIONS À L'ŒUVRE

Pour atteindre les objectifs de neutralité carbone, des solutions de rupture sont attendues. Pour diminuer les émissions de CO₂, différentes options peuvent être mises en œuvre. La recherche permet de développer de nouveaux procédés, d'intégrer de nouveaux vecteurs énergétiques (électricité, hydrogène, EnR) ou de récupérer le CO₂ émis.

L'industrie lourde est confrontée à un verrou technologique. Les solutions aujourd'hui matures connues en matière de décarbonation demeurent nécessaires mais insuffisantes pour atteindre les objectifs de neutralité carbone. Il est estimé par exemple que les meilleures techniques disponibles permettront à l'industrie cimentière de n'atteindre que la moitié de l'objectif de réductions des émissions de CO₂ à l'horizon 2050¹. C'est pourquoi, à travers l'APRED, l'ADEME a financé 22 projets pour un montant d'aides de 4,96 M€. La moitié de ces projets ont porté sur des procédés d'efficacité énergétique, l'autre moitié sur les procédés bas carbone, la décarbonation de la chaleur et des procédés, et sur le captage stockage du CO₂.

LES PROCÉDÉS BAS CARBONE

L'APRED a permis de soutenir sept projets : [SOLARWOOD](#), [CI2D](#), [SMART'AIR](#), INCINERATIONDE, FACInEN, SERENADE, [SEMISOL](#). Plusieurs de ces projets concernent des secteurs particulièrement énergivores : le séchage ou la distillation.

Ainsi, SOLARWOOD visant le séchage du bois d'œuvre a démontré la faisabilité technique et économique du couplage d'une énergie solaire hybride à air (dite thermovoltaïque) à un séchoir de bois d'œuvre. La baisse des émissions de CO₂ avec cette solution peut atteindre 25 %. La rentabilité ne peut être atteinte qu'avec des économies d'échelle et un soutien public (un prix incitatif de la tonne de CO₂ par exemple).

Le projet FACInEn, issu de l'édition 2018/2019 et encore en cours, s'adresse à la distillation, l'une des plus importantes méthodes de séparation thermique dans l'industrie des procédés chimiques mais dont les besoins énergétiques sont importants (environ 3 % de la demande énergétique mondiale). Ce projet prend la suite du projet InTherCoMM, initié dans le cadre du huitième AMI ADEME TOTAL et financé par TOTAL, qui a démontré la faisabilité d'une solution technologique innovante. L'objectif du projet FACInEn, coordonné par le laboratoire de génie chimique de l'ENSIACET, est de mettre en œuvre un démonstrateur pré industriel de colonne HIDiC² permettant de réduire de 40 % la consommation énergétique des colonnes à distiller.

INCINERATIONDE, issu de l'édition 2017, est un projet innovant d'électrification des procédés permettant en outre de réduire les impacts sanitaires et environnementaux des Composés Organiques Volatils (COV) dans l'in-



dustrie. De nombreux secteurs sont en effet contraints d'utiliser un traitement d'oxydation thermique des COV, pour abattre leurs émissions polluantes dans l'air au niveau qu'il leur est réglementairement imposé. Or ces équipements sont fréquemment alimentés en gaz naturel. Ils contribuent aux émissions de CO₂, et sont également coûteux et encombrants. Ce projet a permis de mettre au point un prototype dont l'efficacité est supérieure à 99 % pour l'incinération de COV de trois familles différentes et a montré que cette technologie semble très bien adaptée au traitement de faibles débits d'air et présentant des concentrations élevées en COV. À ce stade, les marchés visés sont donc la pharmacie et l'imprimerie car ce sont des industries qui font face à de telles contraintes.

VERS UNE APPROCHE SYSTÉMIQUE DE LA DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE

Les projets traitant de la décarbonation doivent être abordés également de manière systémique, à une échelle plus grande que le procédé ou qu'un site industriel seul.

Le projet EPIFLEX vise ainsi à développer une méthodologie innovante de conception économiquement optimisée d'éco-parcs industriels en prenant en compte la dynamique de chaque procédé industriel étudié ainsi que les opportunités de production et de valorisation de ressources (énergie et matières) renouvelables et récupérables à l'échelle du territoire. La méthodologie développée vise à optimiser des zones industrielles existantes mais aussi la construction d'éco-parcs neufs ou encore l'implantation d'un nouveau site industriel dans une zone industrielle ou dans un éco-parc déjà existant. Une fois la méthodologie développée et implémentée dans un outil d'aide à la décision (TRL 4-6), elle sera testée et utilisée sur des cas d'études (Grand Port Maritime de Dunkerque, Fos-sur-Mer, etc.). En parallèle de ces développements, une méthodologie d'évaluation de l'efficacité environnementale de la zone industrielle, basée sur l'analyse de cycle de vie, sera proposée afin de caractériser les principaux impacts environnementaux de la zone et de favoriser l'implémentation de synergies entre industriels selon différents critères (émissions de gaz à effet de serre, consommations énergétiques, consommations d'eau, etc.).

LA RÉCUPÉRATION DU CO₂

Lorsqu'il n'est plus possible d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés, ou que la décarbonation n'est pas possible, le captage et le stockage géologique du CO₂ peuvent constituer une solution si elle est validée au plan technique, économique et social. Cette filière présente notamment un intérêt pour les secteurs industriels fortement émetteurs (sidérurgies, cimenteries, raffineries...) pour lesquels il existe aujourd'hui peu d'alternatives techniques pour réduire leurs émissions.

11 projets liés au CSC ont été soutenus depuis 2005, pour un montant d'aide de 3,7 M€. Le CO₂ peut être valorisé de différentes façons. L'utilisation du CO₂ comme matière première et « réactif » en chimie, est réalisable par différentes techniques : minéralisation, synthèse organique, hydrogénation, reformage sec, électrolyse, thermochimie, etc. Les produits obtenus trouvent des applications comme vecteurs énergétiques, composés chimiques ou encore matériaux de construction. La valorisation biologique qui consiste à utiliser le CO₂ comme nutriment auprès d'organismes qui réalisent la photosynthèse (comme des algues), présente plusieurs intérêts dont celui de pouvoir utiliser directement du CO₂ contenu dans les fumées d'incinérateurs. Nous vous invitons en complément sur ce thème, à lire [l'article sur la thèse de Clara Tosi](#), Valorisation des solutions de captage du CO₂ pour la décontamination des sols, publié dans la [version digitale de cette lettre](#), qui étudie la manière d'extraire des métaux notamment toxiques des sols contaminés par des solutions organiques issues du captage du CO₂ et de les valoriser en augmentant la part



de matériau de substitution rentrant dans la composition du ciment.

De nombreuses améliorations ont été obtenues grâce à la R&D, mais pour parvenir à la décarbonation, des ruptures technologiques sont nécessaires. L'ADEME a donc engagé un travail collaboratif avec l'Alliance de recherche ANCRE pour identifier de nouvelles voies de recherche. Un premier webinar s'est tenu le 9 mars 2021 sur les « Innovations de rupture pour la décarbonation de l'industrie chimique » pour rapprocher les laboratoires de recherche académiques de la demande industrielle et orienter de futurs appels à projets. D'autres industries technologiques et industries seront ciblées dans le courant de l'année 2021. ●

1. Source : plan de transition sectoriel de l'industrie cimentière en France finance-climact.fr/wp-content/uploads/2021/03/Synthese_PTS_03-02-21_QuadriModifiee_BD.pdf

2. Heat-Integrated Distillation Column



ZOOM SUR ...

Les leviers de la décarbonation industrielle

Afin d'atteindre des objectifs de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre, les industriels peuvent choisir d'activer plusieurs leviers pour décarboner leurs activités :

- L'amélioration de l'efficacité énergétique ;
- L'efficacité énergétique et matière des procédés ;
- L'utilisation de matières premières alternatives ayant une empreinte carbone plus faible ;
- L'utilisation d'un mix énergétique décarboné ;
- Le captage, stockage du CO₂ et sa valorisation.

ELIÉTA CARLU
Directrice de l'Alliance
industrielle pour la
compétitivité et l'efficacité
énergétique (ALLICE).



AUDE-CLAIRE HOUDON
Ingénieure,
correspondante R&D
et innovation au service
Industrie de l'ADEME.



« DÉVELOPPER DES SOLUTIONS PERFORMANTES SUR UN PLAN TECHNIQUE, MAIS AUSSI ÉCONOMIQUE »

La Stratégie nationale bas carbone (SNBC) fixe des objectifs ambitieux aux industriels à l'horizon 2050. Pour les atteindre, les solutions techniques actuelles basées sur l'optimisation de l'efficacité énergétique et l'utilisation d'énergie décarbonée sont insuffisantes. Il est donc nécessaire de concevoir dès à présent des procédés innovants efficaces, mais aussi capables de répondre aux impératifs économiques de la filière.

L'Alliance industrielle pour la compétitivité et l'efficacité énergétique (ALLICE) a été créée en 2018. Avec quels objectifs ?

Eliéta Carlu : ALLICE a été créée pour accélérer la décarbonation de l'industrie et sa transition énergétique afin de répondre à l'urgence des enjeux environnementaux et climatiques et à la limitation des ressources... tout en maintenant l'industrie française performante et compétitive. Dans cette perspective, il est indispensable de rassembler et de mobiliser différents acteurs du secteur dans une approche transversale afin d'innover et de faciliter le transfert de technologies entre la recherche et l'industrie. ALLICE a précisément pour objectif de faciliter les échanges entre des acteurs par nature très dispersés tout en tenant compte des impératifs économiques de la filière.

Pourquoi l'ADEME soutient-elle ALLICE ?

Aude-Claire Houdon : L'Agence soutient activement ALLICE depuis sa création en 2018 car cette structure est un relais efficace pour promouvoir l'innovation pour la décarbonation de

l'industrie. Ses adhérents, équipementiers, industriels et fournisseurs de solutions énergétiques sont la cible prioritaire de nos dispositifs de soutien.

Quels besoins de recherche ou quels types d'innovations souhaitez-vous susciter chez vos adhérents et partenaires ?

E. C. : Pour que les industriels s'engagent dans la décarbonation de leurs systèmes de production, il importe de sécuriser à la fois la performance technique de leurs projets et leur capacité à amortir leurs investissements. Les travaux que nous menons avec nos adhérents portent sur des leviers d'innovation (qui peuvent être technologiques, méthodologiques, numériques ou encore économiques). À titre d'exemples, nous pouvons travailler sur l'amélioration de l'efficacité énergétique (c'est d'ailleurs là le cœur de nos travaux), sur l'intégration d'énergies alternatives (comme les gaz décarbonés, la chaleur de récupération, etc.) ou encore sur le captage et la valorisation du CO₂. Nos travaux portent également sur des questions liées à l'économie circulaire ou aux modèles économiques

BIO EXPRESS

Eliéta Carlu est ingénieure de formation et diplômée de l'École des Mines de Nancy, avec une spécialisation en ingénierie des procédés énergétiques et environnementaux. En janvier 2020, elle prend la direction de l'Alliance industrielle pour la compétitivité et l'efficacité énergétique (ALLICE), créée en 2018 à l'initiative du Centre Technique des Industries Aérodynamiques et Thermiques (CETIAT), associé à des centres d'expertise de premier plan (le CETIM, le CTCPA et l'ENECA), en partenariat avec le CEA Liten. En 2020, le CTIF et le CTMNC ont rejoint ALLICE.

pérennes, ou encore sur des sujets liés à la transition numérique. À ce jour, nous avons déjà réalisé plus d'une dizaine d'études collectives sur ces différents sujets.

Quelles sont les priorités de recherche de l'ADEME sur la décarbonation de l'industrie ?

A.-C. H. : Nos priorités ont évolué et nous les avons formalisées dans l'APR Énergie durable (APRED) lancé fin 2020. Globalement, il s'agit pour nous d'encourager le développement de procédés innovants dans le secteur de l'industrie énérgo-intensive. Notre objectif est de faire émerger des solutions de rupture pour abaisser les émissions de gaz à effet de serre. Les travaux viseront principalement l'innovation dans les procédés au cœur de la transformation dans les secteurs énérgo-intensifs en allant au-delà de l'efficacité énérgétique des utilités ou du système. Des projets sont notamment souhaités sur l'introduction de matériaux bas carbone, l'éco-conception des procédés alliant efficacité énérgétique et efficacité matière, l'intégration d'énergies décarbonées, l'électrification des procédés.

Quelles actions ALLICE met-elle en œuvre pour mobiliser ses adhérents ou susciter de nouvelles adhésions ?

E. C. : Nous réunissons régulièrement les acteurs du secteur industriel, qui sont très variés (il peut s'agir d'industriels exploitants, d'offres de solutions, d'énérgéticiens, de prescripteurs, d'organismes de financement, de centres de compétences et de recherche, etc.). En travaillant ensemble, nous croisons les objectifs et les besoins de chacun et pouvons entreprendre des travaux capables de répondre à ces attentes. Ce mode opératoire nous permet également de mutualiser les ressources, et donc de mener des travaux que chaque acteur n'aurait pas toujours eu les moyens de mener s'il était resté isolé.

Au-delà de ces études et de la veille stratégique que nous faisons tout au long de l'année, nous menons également des actions pour accélérer l'émergence de projets d'innovation collaboratifs ou encore valoriser les innovations de nos adhérents (comme notre congrès biennal, mais aussi d'autres rencontres dédiées à des thèmes spécifiques). Et bien sûr nous portons la voix de la filière auprès des instances institutionnelles compétentes.

La stratégie nationale bas carbone fixe des objectifs ambitieux aux industriels : quels acteurs vous semble-t-il pertinent de mobiliser pour les atteindre ?

A.-C. H. : La SNBC demande en effet au secteur industriel de réduire de 81 % (par rapport à 2015) ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Le service Industrie de l'ADEME s'est restructuré précisément pour réfléchir aux travaux à mettre en œuvre afin d'aider les industries à atteindre cet objectif. Nous comptons nous concentrer sur les acteurs les plus énérgo-

C'est dès à présent qu'il faut développer les solutions techniques que les industries utiliseront en 2050.

go-intensifs, à l'instar de l'industrie du ciment, de l'acier, de l'aluminium, du papier carton, du verre et aussi de certains produits chimiques. Les chiffres parlent d'eux-mêmes : ce secteur, qui représente en France seulement 3 % des entreprises de plus de 20 salariés, est à l'origine de 70 % des consommations énérgétiques et de 75 % des émissions de gaz à effet de serre. Accompagner les plus gros émetteurs est, selon nous, le meilleur moyen d'obtenir des effets positifs rapidement. Mais les technologies actuelles ne permettront pas d'atteindre ces objectifs. C'est pourquoi nous encourageons le développement d'autres solutions, performantes sur le plan technique mais aussi sur le plan économique, afin d'inciter les industriels à s'en emparer.

Qu'attendez-vous du Congrès biennal que vous organisez ?

E. C. : La raison d'être de notre premier congrès biennal est de faire bénéficier le plus grand nombre d'acteurs possibles de nos travaux et de leur permettre d'identifier les technologies d'avenir dans leur secteur. Nous souhaitons également créer une passerelle entre la recherche et de l'industrie afin de faciliter les transferts entre ces deux mondes.

Y a-t-il une urgence à travailler sur ces sujets de recherche ?

E. C. : Absolument. Si l'on veut atteindre les objectifs climatiques et environnementaux affichés dans la SNBC, il est incontournable d'accélérer la décarbonation de l'industrie. Et, de mon point de vue, ces enjeux doivent être couplés à la compétitivité, à la relance. Autrement dit, il importe que l'industrie française reparte de plus belle tout en intégrant cette question.

A.-C. H. : Il faut par ailleurs avoir à l'esprit que les actifs industriels sont déployés pour une durée de trente à cinquante ans. Si nous choisissons aujourd'hui d'adopter des solutions qui ne sont pas en rupture, nous sommes sûrs d'avoir encore ces actifs en place en 2050. Donc ce n'est pas demain qu'il faudra faire le choix de procédés industriels innovants, mais bien aujourd'hui. En d'autres termes, oui, il y a urgence. ●

