

BOOK CACTUS

Novembre 2024



DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE





PULSALYS

CNRS INNOVATION


RÉSEAU SATT

CACTUS

Consortium pour l'Accélération déCarbonée
et le Transfert pour l'indUStrie

ÉDITO

Valérie MAZZA et Mehdi GMAR

..... 4

L'INDUSTRIE, SECTEUR INCONTOURNABLE POUR DÉCARBONER LA FRANCE

..... 6

LES SECTEURS LES PLUS EMETTEURS : PARTICULARITÉS ET SOLUTIONS ÉMERGENTES

..... 8

LES AXES DE RECHERCHE POUR LES SOLUTIONS DE DÉCARBONATION

..... 12

AU-DELÀ DE LA TECHNOLOGIE, LES INNOVATIONS MÉTHODOLOGIQUES

..... 24

QUELS ENJEUX POUR LA FRANCE ?

Hoang BUI

..... 26

LES APPORTS ATTENDUS DE LA RECHERCHE

· Fabrice LEMOINE

· Antonio PIRES DA CRUZ

..... 28

PAROLES DE CHERCHEUR

Florent BOURGEOIS

..... 32

PAROLES DE CHERCHEUSES

· Annie COLIN

· Alessandra QUADRELLI

..... 34

PAROLES D'ENTREPRENEURS

· Steve VAN ZUTPHEN et Augustin
DE BETTIGNIES

· Patrick BOUCHARD

..... 38

KEY OPINION LEADER INDUSTRIEL

Julien POILLOT

..... 44

COMMENT CANDIDATER AU DISPOSITIF CACTUS ?

..... 46

LES PARTENAIRES DU CONSORTIUM CACTUS

..... 47

Le consortium CACTUS ambitionne la mise sur le marché de nouvelles solutions de décarbonation de l'industrie



L'urgence de la transition environnementale demande aujourd'hui une mobilisation de tous les acteurs pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Troisième secteur émetteur de CO₂ derrière les transports et l'agriculture, l'industrie représente environ 20% des émissions françaises. Dans le contexte de l'accord de Paris et de la législation européenne, la France s'est engagée comme ses partenaires européens à atteindre la neutralité carbone en 2050.

La Stratégie Nationale d'Accélération (SNA) de la « Décarbonation de l'Industrie », initiée en 2022 par l'Etat a l'ambition diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre en 10 ans et vise également à accompagner le déploiement d'une offre de technologies innovantes.

Le consortium CACTUS, lauréat de l'Appel à Projets France 2030, coordonné par PULSALYS et CNRS Innovation, bénéficie d'une enveloppe de 22 M€ pour le financement des programmes de prématuration et de maturation sur 5 ans et se mobilise pour soutenir l'émergence de solutions de rupture au sein des laboratoires académiques.

L'enjeu de ce consortium est de contribuer à la structuration de l'offre technologique en préparant les solutions de décarbonation de demain, au développement de nouveaux procédés s'inscrivant dans la filière de l'industrie verte et à l'émergence d'une offre française compétitive de solutions de décarbonation de l'industrie.

Le rôle des chefs de file de CACTUS

La mission des chefs de file prématuration (CNRS Innovation) et maturation (PULSALYS) est de travailler au service de la communauté, de coordonner, d'animer et de mettre en œuvre la volonté de l'ensemble des membres du consortium CACTUS.

PULSALYS et CNRS Innovation ont un rôle de support aux structures de valorisation dans le cadre de la détection des projets sur le territoire. Les chefs de file organisent les comités de sélection en réunissant les experts de la filière pour que des projets ambitieux dans le domaine de la décarbonation de l'industrie portés par les chercheurs de la recherche publique puissent obtenir des financements de prématuration ou maturation de la Stratégie Nationale d'Accélération.

CACTUS permet également de soutenir des projets en co-développement avec des partenaires industriels, qu'ils soient startup, PME ou grand groupe de manière à prendre en compte au plus tôt dans le processus de maturation des contraintes liées aux réalités de terrain et dérisquer au mieux les phases de scale-up qui suivront ces phases laboratoire.



La décarbonation des activités est aujourd'hui au cœur de la transition environnementale.

Conjuguer compétitivité et réduction d'émission des gaz à effet de serre est un défi vital pour tous les secteurs industriels, qui ouvre de nombreux champs de recherche pour concevoir de nouvelles voies d'action. Dans le cadre du programme France 2030, l'état déploie des moyens inédits pour aider l'ensemble des acteurs, du laboratoire à l'usine, à imaginer, développer et implémenter de nouvelles solutions.

Le consortium CACTUS a aujourd'hui la capacité d'accélérer le passage à l'échelle de ces innovations en vue d'un transfert vers l'industrie. Le réseau SATT et ses partenaires s'emploient à détecter au cœur des laboratoires académiques les solutions les plus impactantes et à contribuer à leur développement.

Depuis le début d'année, nous avons pu soutenir des projets prometteurs, dont certains ont donné lieu à la création de startups : continuons nos efforts pour que décarbonation rime in fine avec réindustrialisation !

Valérie MAZZA
Présidente de PULSALYS



CACTUS est un des dispositifs clé de la Stratégie Nationale d'Accélération (SNA) sur la décarbonation de l'industrie élaborée par l'État. Cette vision nationale est très ambitieuse et les moyens sont importants pour adresser tout le continuum de la filière : de la recherche à la mise sur le marché de solutions jusqu'au financement d'investissements pour la mutation des outils de production.

En s'appuyant, sur les acteurs nationaux et locaux réunis dans un consortium, CACTUS vise à soutenir et dérisquer les projets dans des phases spécifiques de prématuration ou de maturation technologique.

CNRS Innovation est mobilisé avec PULSALYS, pour coordonner ce nouveau dispositif et nous sommes collectivement engagés, avec les membres du consortium pour détecter les projets, les accompagner et les soutenir afin d'apporter des solutions technologiques concrètes aux enjeux de décarbonation et de réindustrialisation sur le long terme. Porteurs de projets, n'hésitez pas à nous contacter, nous connaissons votre sensibilité à l'impact et CACTUS peut vous aider à transformer vos résultats de recherche en solutions pour les industriels !

Mehdi GMAR
Directeur Général du CNRS Innovation

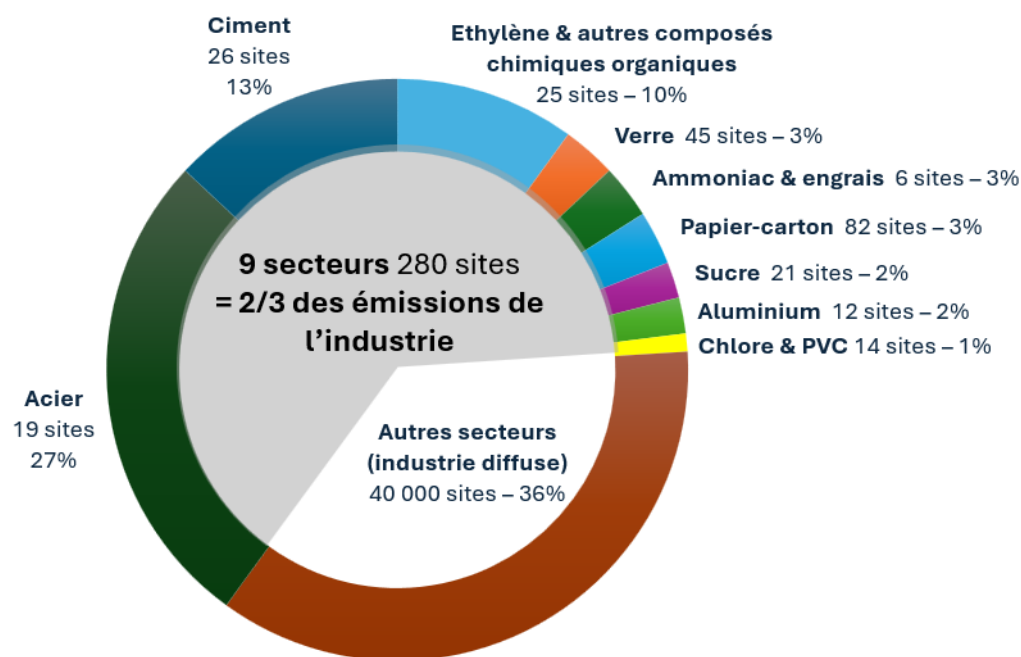
L'INDUSTRIE, SECTEUR INCONTOURNABLE POUR DÉCARBONER LA FRANCE

L'industrie, 3ème secteur le plus émetteur en France

La France a émis 385 millions de tonnes équivalent (Mtéq) CO₂ en 2023, un chiffre qui monte à 623 Mtéq CO₂ en incluant les émissions liées aux produits importés.

L'industrie représente 18% de ces émissions. Elle est le 3ème secteur le plus émetteur, après les transports et l'agriculture. La responsabilité des émissions industrielles est très concentrée sur un petit nombre de sites industriels répartis en 9 secteurs clés.

Émissions industrielles de GES en 2021



Un tiers des émissions industrielles sont émises par les procédés eux-mêmes (production de clinker et de chaux, vapocraquage, etc.). Les deux autres tiers sont causés par les consommations énergétiques. Celles-ci se répartissent en deux catégories : d'une part, la production d'utilités (vapeur, froid, air comprimé, pompage et autres moteurs, etc.), qui représentent un tiers des consommations ; d'autre part, les consommations propres aux procédés (fours, sécheurs etc.). À noter que 70% de ces usages énergétiques servent à satisfaire des besoins en chaleur.

Atteindre la neutralité carbone en 2050

La Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) mise en place par le gouvernement français fixe les objectifs de décarbonation : par rapport à 2015, les entreprises françaises doivent **diminuer leurs émissions de 35 % d'ici 2030, et de 81 % d'ici 2050** (soit environ 80 Mtéq CO₂/an). Un projet de révision de la SNBC, aligné sur les objectifs européens « Fit for 55 », a même prévu de rehausser les objectifs à -55 % d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) dès 2030.

Pour atteindre ces objectifs, les efforts se concentrent en priorité sur les 50 sites les plus émetteurs de France. Ils visent à abattre à la fois les émissions liées à la production de l'énergie utilisée par ces sites, dites émissions énergétiques, et les émissions liées au fonctionnement propre des procédés.

L'innovation, levier incontournable de réussite

Si la sobriété et l'amélioration continue sont des leviers nécessaires à la décarbonation, le rôle de l'innovation reste central : l'Agence Internationale de l'Energie estime que seulement 40% du chemin vers la neutralité carbone peut être assuré par des technologies déjà à notre disposition. **Les 60% restants ne se feront qu'avec des technologies qui sont encore au stade de développement.** Parmi elles, l'hydrogène électrolytique pour l'ammoniac, les réacteurs nucléaires modulaires (SMR), le captage du dioxyde de carbone (CO₂) ou encore des batteries de pointe. Pour accélérer l'émergence de ces technologies, des efforts conséquents en R&D sont à fournir, ainsi que de forts investissements pour l'installation de démonstrateurs.



LES SECTEURS LES PLUS ÉMETTEURS : PARTICULARITÉS ET SOLUTIONS ÉMERGENTES

Les secteurs apparaissent dans l'ordre décroissant des plus fortement émetteurs.



Un focus a été réalisé pour chacun des secteurs les plus émetteurs de GES, sur la base des Plans de Transition Sectoriels (PTS) coconstruits par l'ADEME et les représentants desdits secteurs. Chaque encadré met en lumière les principales particularités d'un secteur, ainsi que des technologies clés de sa feuille de route de décarbonation.

Seules les solutions les moins matures sont citées ici pour mettre en lumière les besoins d'innovation pour la décarbonation industrielle. La liste complète des solutions mises en œuvre dans les diverses feuilles de route de décarbonation est accessible dans les mémos de chaque PTS.

ACIER



Particularités du secteur

Le secteur de l'acier est séparé en 2 filières :

- Les aciers plats : fabriqués dans les hauts fourneaux et gros consommateurs de charbon, ils constituent 70 % de la production d'acier française.
- Les aciers longs : fabriqués par chauffe électrique (1500 °C) de ferraille recyclée, ils constituent les 30 % de production restants.

Solutions émergentes

- Injection d'hydrogène ou de biomasse gazéifiée comme agent réducteur à la place du coke de charbon dans les hauts fourneaux. Le programme suédois HYBRIT a abouti à la première production d'acier par ce biais en 2021.
- Utilisation d'hydrogène en remplacement du gaz naturel comme agent réducteur pour la production de minerai de fer pré-réduit. Des expérimentations sont en cours : Gravithy (Fos-sur-Mer, France), H2 Green Steel (Suède), H2Future (UE), Arcelor Mittal (Espagne).
- Électrolyse du fer (ex : Projet SIDERWIN).



CHIMIE

Avec ses 6000 sites, le secteur est très diversifié. Ses émissions de GES sont cependant dues de manière prédominante à la production de 3 réactifs de base : l'éthylène, le dichlore (notamment pour la production de polymères plastiques) et l'ammoniac.

Ethylène

Particularités du secteur

L'éthylène est traditionnellement produit par vapocraquage d'hydrocarbures fossiles, réaction générant de grandes quantités de CO₂.

Solutions émergentes

- Utilisation de biodiesel ou bio-nafta lors du vapocraquage ; ou électrification du vapocraquage (ex : projet « Cracker of the Future »).
- Synthèse d'alcènes à partir d'hydrogène et de CO₂ ("Methanol to Olefin") en alternative au vapocraquage.
- Production de bioéthylène par déshydratation de bioéthanol.
- Captage, stockage et valorisation du CO₂ sur vapocraquage (envisageable du fait de la forte concentration de CO₂ dans les fumées).

Dichlore

Particularités du secteur

Le procédé est déjà basé à 85 % sur l'électrolyse de l'eau, réduisant le nombre de leviers restants pour sa décarbonation.

Solutions émergentes

- Utilisation de vapeur 100 % décarbonée produite à partir d'hydrogène, de biomasse ou de biogaz.

Ammoniac

Particularités du secteur

L'ammoniac a un fort impact carbone : il est obtenu à partir de la réaction à 450°C entre du diazote et du dihydrogène principalement issu du vaporeformage du méthane.

Solutions émergentes

- Production d'hydrogène par électrolyse.
- Remplacement du méthane par du biogaz.
- Synthèse directe de l'ammoniac à partir d'eau et d'air sans production intermédiaire d'hydrogène.



CIMENT

Particularités du secteur

L'activité est très concentrée sur quelques acteurs (5 groupes industriels) mais répartie sur l'ensemble du territoire. La réaction de calcination du clinker (l'ingrédient principal du ciment) est responsable des 2/3 des émissions de GES du secteur, le reste étant dû à la combustion de gaz fossile.

Solutions émergentes

- Capture et stockage du CO₂.
- Amélioration du recyclage à travers la réintégration des gravats de construction dans la chaîne de production de ciment.



PAPIER-CARTON

Particularités du secteur

Environ 95 % des émissions de GES dues à la production de chaleur par combustion de gaz fossile. Les efforts de décarbonation de la filière se traduisent donc surtout par la recherche d'améliorations de son efficacité énergétique et le verdissement de son mix.

Solutions émergentes

- Pompe à chaleur très haute température.



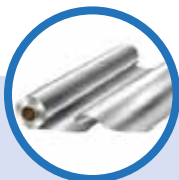
SUCRE

Particularités du secteur

Les émissions de GES du secteur sont majoritairement liées à la production de chaleur. La production sucrière étant très saisonnière (110 jours par an) et les marges de production faibles, la rentabilisation des investissements en efficacité énergétique est plus difficilement atteignable que dans d'autres secteurs.

Solutions émergentes

- Électrification via compression mécanique de vapeur (déjà déployée sur quelques sites) et pompes à chaleur haute température.
- Gazéification hydrothermale des vinasses. Ce débouché permettrait de valoriser en gaz un coproduit par ailleurs inhibiteur dans les procédés de méthanisation.
- Méthanisation des eaux terreuses issues du lavage des betteraves. Mêlant économies d'eau, d'énergie et réduction de la charge organique dans les effluents, cette solution pourrait apporter entre 5 et 10 % de la consommation énergétique finale des sucreries en 2050.



ALUMINIUM

Particularités du secteur

La filière française de l'aluminium compte 2 sites de production d'aluminium primaire, 6 usines de recyclage direct et 10 usines d'affinage. Pour l'aluminium primaire, les ¾ des émissions directes sont liées au procédé même, et non à la consommation d'énergie : l'anode en carbone utilisée lors de l'électrolyse est fabriquée à partir de coke de pétrole calciné et de brai de houille, et relâche du CO₂ et des perfluorocarbones lors de la réaction.

Solutions émergentes

- Développement d'anodes inertes empêchant la réaction d'oxydation du carbone de l'anode.
- Développement d'anodes produites à partir de carbone provenant de biomasse.
- Pour l'aluminium primaire, la capture et le stockage du carbone pourrait couvrir 30 % des émissions (limitations géographiques).



VERRE

Particularités du secteur

On compte une cinquantaine de sites de production en France, dont une trentaine couvrent 75% des émissions. La production de verre demande un fort apport thermique à maintenir sans interruption.

Solutions émergentes

- Électrification des fours de grande capacité, en surveillant les impacts sur le calcin et sur la durée de vie des équipements. Le programme européen « Furnace for the Future », réunissant les 20 plus gros verriers d'Europe expérimente en Allemagne un pilote four de grande capacité (> 200 T/jour) à 80 % électrique.
- Substitution des combustibles fossiles par de l'hydrogène. Ceci nécessite le développement de fours compatibles avec une combustion 100% hydrogène, l'évaluation de la durée de vie de ces nouveaux équipements et la caractérisation de l'impact du changement de gaz sur les émissions d'oxydes d'azote (NOx).

INDUSTRIE DIFFUSE

Particularités du secteur

L'industrie dite diffuse, c'est-à-dire tout ce qui ne relève pas des 9 secteurs carbo-intensifs cités inclut l'agro-alimentaire, la chimie fine, le caoutchouc, la plasturgie, la métallurgie, l'automobile,

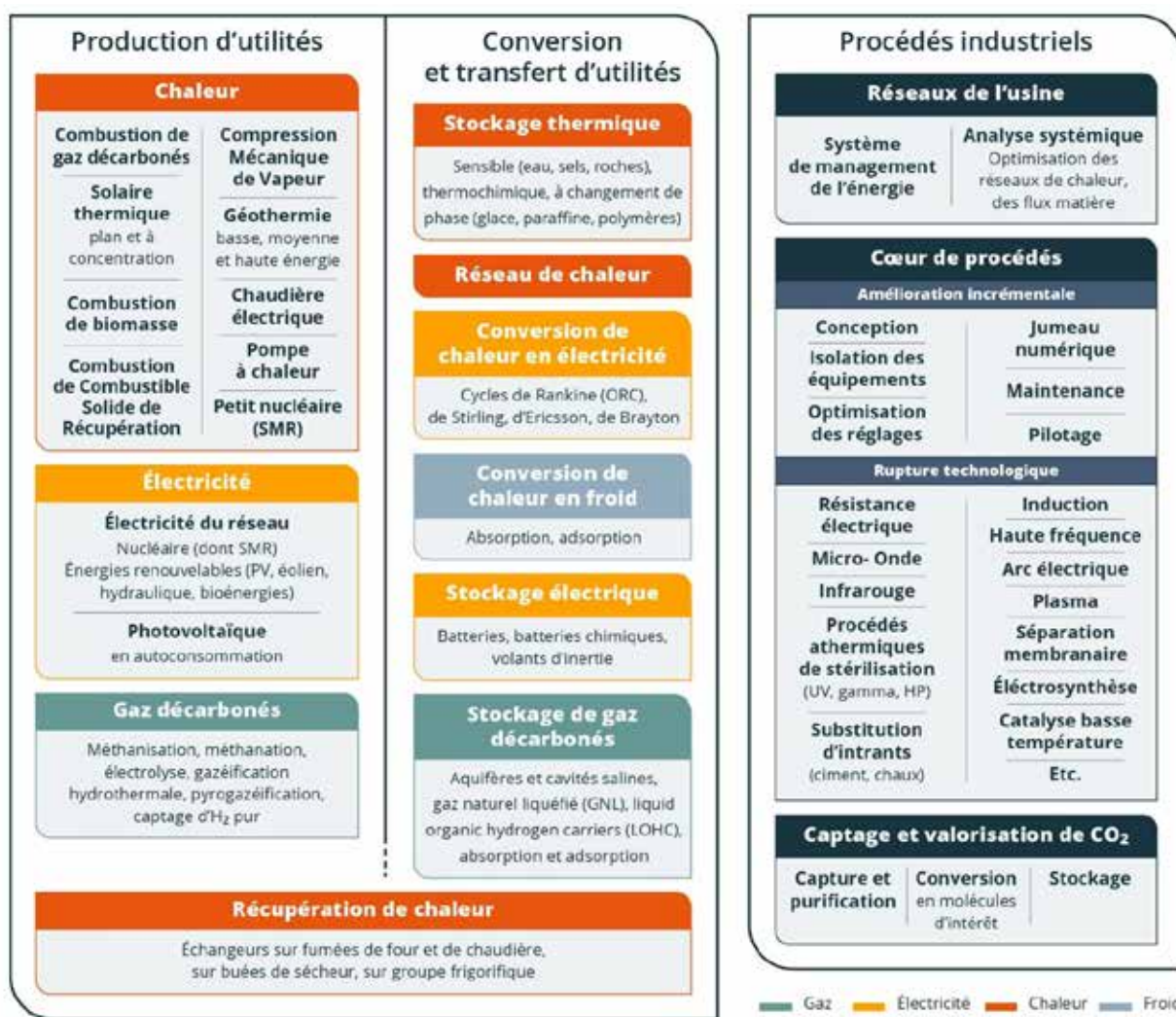
le textile, l'ameublement, l'électronique, etc. Elle se caractérise par une très grande diversité de procédés et de produits, un fort éparpillement géographique et un écosystème dominé par les PME, dont les moyens d'investissements sont moindres que les grands groupes. Leurs enjeux concernent principalement leurs consommations et leurs mix énergétiques.

LES AXES DE RECHERCHE POUR LES SOLUTIONS DE DÉCARBONATION

La décarbonation de l'industrie est une problématique complexe aux multiples aspects, il n'est donc pas étonnant que toute une batterie de technologies ait vu le jour pour répondre à ces enjeux. Plus ou moins récentes, leurs niveaux de maturité technologique et marché varient grandement. Le schéma ci-dessous en dresse une cartographie, qui grâce aux efforts de recherche des laboratoires et des industriels, est amenée à s'enrichir constamment.

Dans les chapitres suivants, seront présentés plusieurs axes clés de décarbonation qui font face, aujourd'hui, à des verrous technologiques du point de vue de leur intégration dans les procédés industriels.

Solutions de décarbonation des usages énergétiques en industrie*



© ALLUE - 2024, inspiré du schéma « Technologies de la décarbonation », Je décarbonne.fr



Réévaluer les besoins des procédés : première étape essentielle pour décarboner

Les besoins du cœur de procédé

Remettre en question le processus de production lui-même, à chaque étape, peut souvent aboutir aux gains les plus significatifs en matière de réduction des émissions de CO₂. Ces innovations de rupture reposent sur les avancées technologiques et méthodologiques des dernières années : outils numériques et de simulation, fabrication additive, intensification des procédés... Celles-ci permettent de se libérer des contraintes liées aux équipements existants. Elles ouvrent la voie à une remise en question des procédés les plus traditionnels, en déplaçant la réflexion de « Quels équipements disponibles peuvent répondre à mes besoins ? » vers « Quels sont les besoins intrinsèques de la production ? ».

La fabrication additive et les outils de simulation permettent d'imaginer de nouveaux designs impossibles à manufacturer avec des méthodes traditionnelles, tels que des échangeurs de chaleur aux configurations complexes ou des internes de colonnes à distiller optimisant leur surface d'échange.

L'intensification des procédés, notamment chimiques, présente un fort potentiel énergétique : outre l'optimisation de la réaction in situ, le développement de microréacteurs permet **d'améliorer la compréhension profonde des facteurs impactant la réaction**. Cet outil permet de coupler la réaction avec d'autres opérations unitaires lorsque cela est opportun, et ainsi de réduire sa consommation énergétique. À titre d'exemple, une colonne de distillation réactive combine dans la même étape une réaction chimique et la séparation de ses produits ; tandis qu'un réacteur échangeur permet de réguler une réaction endothermique ou exothermique en récupérant l'énergie issue d'un autre procédé.

Les catalyseurs, molécules capables d'accélérer une réaction chimique et d'en réduire l'énergie d'activation, sont utilisés depuis des décennies en industrie pour diverses applications. L'orientation récente des travaux de recherche font entrevoir des potentiels de décarbonation significatifs.

La recherche de **(bio-)catalyseurs visant spécifiquement à réaliser des réactions à plus basse température** pourrait avoir des retombées importantes sur les consommations énergétiques des secteurs de la chimie de base et de la chimie fine.

Par ailleurs, les industriels s'intéressent à réduire l'impact des catalyseurs eux-mêmes. Ainsi, la société japonaise Unitika a récemment annoncé la première polymérisation de polyester à l'aide de **catalyseurs non métalliques**. Dans des secteurs comme la pétrochimie, le développement de catalyseurs alternatifs sont souhaitables : la régénération des catalyseurs actuellement utilisés dans le cycle du raffinage pétrolier passe par la combustion du coke déposé, générant de grandes quantités de CO₂.



La régénération des catalyseurs est d'ailleurs elle-même un domaine de recherche très dynamique : les catalyseurs coûtent généralement cher et leur impact environnemental en fin de vie n'est pas neutre. Une amélioration même minime du nombre de cycles de régénération que peut supporter le catalyseur a des impacts très importants à l'échelle d'une usine.

Les besoins énergétiques

Pour réduire son impact carbone, il est aussi nécessaire de remettre en question l'apport énergétique nécessaire à la transformation d'un produit. Ainsi, un réseau de vapeur haute pression peut s'avérer inutile si les besoins énergétiques, après optimisation, ne nécessitent que le niveau de température de la vapeur basse pression, ou même d'eau chaude couplée à une pompe à chaleur haute température. À ce sujet, les fluides transcritiques dans les machines thermodynamiques, comme les piles à combustibles très hautes températures, du fait de leurs propriétés spécifiques de température et de pression, apportent des ouvertures intéressantes pour de nombreuses applications industrielles.

Une telle remise en question peut également amener à considérer un changement de vecteur énergétique, source de décarbonation mais aussi souvent de cobénéfices non énergétiques. Ces évolutions nécessitent souvent l'exploration d'innovations de rupture. Citons par exemple le remplacement de hauts fourneaux d'aciéries alimentés au charbon par des **fours à arc électrique** ; ou la production de composants chimiques par **électrosynthèse** plutôt que par voie thermique traditionnelle. L'implémentation de telles modifications structurelles des procédés nécessite des analyses approfondies afin de vérifier et garantir que la qualité du produit final n'est pas affectée.

Les besoins en matière

Au sein de tout système de production et de consommation de produits, les enjeux matière, enjeux énergétiques et enjeux carbone sont intimement connectés. La recherche d'intrants alternatifs, l'optimisation des consommations de matière première et à la gestion de fin de vie sont autant de pistes d'innovation qui pourront réduire l'impact carbone de l'industrie et apporter de nombreux autres cobénéfices.

Nouveaux intrants

Dans nombre de secteurs, les industriels sont en demande d'intrants alternatifs pour leurs procédés.

Ainsi, les cimentiers ont identifié dans leurs enjeux prioritaires la **substitution du clinker** par des intrants générant moins de CO₂. Certains sont connus depuis longtemps (laitiers de hauts fourneaux, pouzzolanes, calcaire...) et d'autres commencent à être explorés (fines de béton ou de verre recyclés), mais ces seules alternatives ne suffiront pas à couvrir les volumes attendus. Par ailleurs, les cimentiers cherchent toujours à augmenter la part de ces intrants au détriment du taux de clinker dans leurs recettes, sans faire de concession sur les propriétés mécaniques des ciments. Citons également les industries du textile qui explorent de nombreuses voies pour substituer des fibres historiquement issues de la pétrochimie par des **fibres biosourcées**.

Des recherches similaires dans divers secteurs visent aussi à répondre à un enjeu de souveraineté : aujourd'hui, seuls 17 % des intrants industriels sont produits sur le territoire français, et 61 % sont importés de pays hors UE.



Plus largement, la recherche de matières premières et intermédiaires aux propriétés innovantes peut contribuer à réduire l'impact carbone des produits par de nombreux biais : réduction de la quantité nécessaire pour répondre au même besoin, transformation à plus basse température, amélioration de la durée de vie par une meilleure résistance aux agressions chimiques ou aux contraintes mécaniques, moindre dispersion de polluants lors de l'usage et en fin de vie...

Optimisation des usages matière

Les procédés de fabrication sont des recettes. Parfois très anciennes, souvent optimisées pour réduire les coûts ou le temps de séjour des produits, celles-ci peuvent aujourd'hui être réexaminées à la lumière de l'enjeu matière. Ainsi, les industriels du papier-carton ou du textile font aujourd'hui la chasse aux chutes.

Par ailleurs, des secteurs aussi variés que la plasturgie, la fonderie, la céramique, l'aviation, la santé et bien d'autres observent avec attention les progrès des outils numériques (**modélisation, simulation, fabrication additive**), qui pourront révolutionner le design de leurs produits, entre autres en rendant possible la fabrication de structures conservant des propriétés similaires en réduisant drastiquement la quantité de matière première utilisée – et donc l'impact carbone lié à cette matière première.

Enfin, le développement **d'outils de modélisation et de suivi**, mais aussi d'équipements spécialisés pourront contribuer à la réduction des pertes matières dues aux non-conformités. Citons par exemple l'enjeu d'assurer un séchage et une cuisson homogènes des briques et tuiles, sans quoi une part non négligeable des produits peuvent s'abîmer et être mis au rebut. Réduire

les non-conformités, c'est faire des économies de matière, mais aussi d'énergie : le gaz brûlé pour cuire une tuile finalement non conforme est une perte sèche.

Bouclage matière, recyclage et fin de vie

Le recyclage matière est un autre enjeu majeur lié à la décarbonation de l'industrie, traité dans la Stratégie Nationale d'Accélération « Recyclage, Recyclabilité, Réutilisation des matières ». Citons à titre d'exemple de fortes attentes sur le recyclage chimique des matériaux en fin de vie, avec notamment le besoin de développer des techniques d'extraction de métaux rares dans les batteries électriques ou dans les catalyseurs usagés.



Intégration des gaz décarbonés

C'est dans le domaine de la production de gaz décarbonés que les développements technologiques sont les plus médiatisés.

Pourtant, des verrous persistent aussi du côté de leur intégration au sein des procédés industriels. Par exemple, la variabilité de composition propre aux gaz issus de matières biologiques (biogaz, syngaz) nécessite le développement de nouvelles solutions d'analyse des gaz et de pilotage en temps réel. Mais ce sont les gaz à fort taux d'hydrogène qui concentrent une bonne partie des enjeux.

Réinventer des équipements compatibles avec l'hydrogène

Issu de l'électrolyse, de la pyrogazéification, du vaporeformage avec capture de CO₂, voire de gisements purs naturels, l'intégration d'hydrogène en taux supérieurs à 30 % dans les gaz de combustion présente des défis techniques significatifs pour l'industrie.

En comparaison du méthane, la molécule d'hydrogène est extrêmement petite, présente une large plage d'inflammabilité, une vitesse de flamme élevée, et une flamme plus chaude. Cela s'accompagne d'une augmentation des risques de fuites, de détonation à l'allumage et de retour de flammes. Les industriels ont donc besoin de nouvelles générations de brûleurs, avec des matériaux hermétiques à l'hydrogène et adaptés à sa température de combustion, ainsi que des injecteurs de gaz repensés pour permettre une injection progressive d'hydrogène au démarrage et de réguler la vitesse de flamme. **La recherche de nouveaux matériaux, la mécanique des fluides numérique (CFD) et la conception assistée par ordinateur seront les fers de lance de l'émergence de ces nouveaux équipements.**

Par ailleurs, une généralisation de l'usage de l'hydrogène, dont la flamme est parfaitement

invisible à l'œil nu à haute température, nécessitera le développement de nouvelles gammes d'outils de détection et de sécurité.

Documenter les impacts de ce changement de vecteur énergétique

Dans le cas (courant) des fours et sécheurs où le produit est en contact direct avec les gaz de combustion, convaincre les industriels d'y injecter de l'hydrogène nécessitera également un gros travail de recherche pour mesurer les impacts de la combustion :

- Sur la tenue des réfractaires, soumis à de plus hautes températures ;
- Sur les cinétiques de cuisson et de séchage du produit, exposé à des gaz de combustion plus chauds mais aussi chargés en vapeur d'eau ;
- Sur les qualités (organoleptiques, apparence, physiques, chimiques, etc.) du produit.





Récupération de chaleur

Avec des pertes annuelles estimées à 109,5 térawattheure (TWh) en 2017 dont la majorité dans les effluents de procédés, **la chaleur fatale industrielle représente un gisement d'efficacité énergétique considérable**. Sa récupération n'est pas une pratique nouvelle. Pourtant, les installations existantes adressent dans leur écrasante majorité les situations les plus simples, et les défis restent nombreux à relever.

Entre 25 et 100°C

D'une part, plus de la moitié du gisement de chaleur fatale (56,6 TWh) est rejetée à 100°C ou moins, c'est-à-dire des températures souvent trop basses pour satisfaire les besoins industriels voisins ou même le chauffage de locaux. Le développement d'outils, tels que **l'analyse systémique** pour les réseaux de chaleur internes aux usines, pourra contribuer à un usage optimal de cette chaleur à basse température. Mais les plus gros débouchés sont dépendants de l'amélioration de solutions de réhausse de température telles que **les pompes à chaleur, la compression mécanique de vapeur, les éjecto-compresseurs ou les thermo-transformateurs à absorption**.

Au-delà des 100°C

D'autre part, même les gisements de chaleur à haute température peuvent être difficiles à valoriser.

- S'accommoder d'effluents aux compositions complexes

Les effluents industriels sont rarement propres. Or la plupart des traitements actuels nécessitent un abaissement de la température de l'effluent par dilution ou par quench (dispersion d'un liquide froid dans le gaz). La récupération de chaleur est donc généralement envisagée en amont de ce refroidissement. L'industriel se confronte dès lors à des problématiques diverses selon la

composition de ses effluents : surchauffe, encrassement particulaire ou biologique, corrosivité, réactivité... Les échangeurs capables de répondre à ces myriades de contraintes spécifiques, sur effluents gazeux à plus de 100°C en particulier, sont encore trop rares. Il s'agit d'un goulot d'étranglement pour la généralisation de la récupération de chaleur.

- Tirer vers le haut les performances de la dépollution

Parallèlement, portée par l'évolution des réglementations, la recherche de techniques de **traitement des fumées à forte sélectivité**, compatibles avec des **hautes températures** et économiquement viables a de l'avenir devant elle, car elle ouvrirait la porte à la récupération de chaleur en aval de la dépollution.

- S'affranchir des contraintes temporelles

Le développement de solutions de **stockage de chaleur à court terme** (< 24h), encore rares en France, pourront apporter une réponse aux déphasages entre heures de rejet et heures de besoin en chaleur. Le stockage à long terme, lui, sous réserve d'atteindre un coût opérationnel compétitif, permettrait de lisser les consommations saisonnières des industriels.

- Maturer les voies de conversion thermique

Enfin, même à l'aide de solutions de remontée en température ou de stockage, les industriels se retrouvent parfois avec des gisements de chaleur fatale supérieurs à leurs besoins et à ceux de leurs éventuels voisins. Entrent alors en jeu les machines thermodynamiques de conversion en froid (absorption, adsorption), en travail ou en électricité (ORC, Ericsson, Stirling...), permettant d'élargir les débouchés potentiels. Si ces solutions émergentes présentent chacune des défis technologiques très spécifiques, elles ont toutes pour points communs un coût initial élevé et un rendement relativement faible. Sans la recherche de matériaux et composants performants à moindre coût, le déploiement de ces solutions à grande échelle risque d'être difficile.

Électrification de la production de chaleur

Aujourd'hui, la majorité des besoins en chaleur de l'industrie reste satisfaite par les énergies carbonées. L'électrification et l'hybridation (gaz/électricité principalement) de la production de chaleur figurent parmi les leviers phares en France du fait du faible impact carbone de notre énergie nucléaire. Il existe un grand nombre de technologies électriques, plus ou moins pertinentes selon les spécificités du procédé et du produit traité. Nombreuses d'entre elles sont déjà relativement matures et efficaces en dessous de 150°C, mais au-delà, les alternatives compétitives au chauffage résistif restent aujourd'hui rares.

Par ailleurs, il est essentiel de multiplier le nombre de pilotes et de démonstrateurs pour prouver la versatilité de ces solutions à travers divers procédés, produits et contraintes techniques. L'hybridation en particulier gagnerait à être expérimentée via des partenariats avec des experts de solutions gaz, pour explorer le potentiel d'intégration de solutions électriques dans des équipements à gaz historiques. On s'attend à ce que les solutions optimales varient grandement selon les contextes : chauffes électrique et gaz successives ou simultanées ; répartition des puissances ; géométries des enceintes ; longueurs d'onde et densité d'émission pour les solutions radiatives... **Si les technologies sont connues, leurs modalités de mise en œuvre sur le terrain restent en grande partie une terra incognita.**

Notons également de manière non exhaustive quelques verrous spécifiques à certaines technologies prometteuses :

Les pompes à chaleur (PAC)

Une dynamique de R&D très forte est enclenchée dans l'espoir d'accélérer l'émergence de **PAC avec des températures utiles dépassant les 150, 200°C**, voire au-delà à terme. Il est également essentiel pour répondre aux enjeux industriels de développer plus de solutions délivrant de très grosses puissances thermiques (1 - 20 MW). Les évolutions réglementaires poussent aussi à la recherche de nouveaux **fluides frigorigènes à moindre impact**. Enfin, les applications imposant des écarts de température importante entre source froide et source chaude (ΔT lift élevés) restent aujourd'hui assez fermées aux PAC du fait de leurs coefficients de performance insuffisants.

Les solutions radiatives (infrarouge, micro-onde, haute fréquence, UV...)

Potentiellement compatibles avec des besoins à très haute température, ces solutions sont limitées par la puissance électrique disponible sur les sites industriels. Dès lors, la recherche d'applications en hybridation prend tout son sens.

Il est par ailleurs nécessaire d'explorer la transférabilité de ces technologies jusqu'ici utilisées dans des cas spécifiques, ce qui suppose de mieux connaître les impacts du type de chauffe sur chaque produit, mais aussi les potentiels cobénéfices au-delà de l'efficacité énergétique (durée de traitement, nombre d'étapes, homogénéité du produit, propriétés organoleptiques...).





Intégration de chaleur renouvelable

Solaire thermique

Usages pour la production d'utilités

L'une des briques technologiques essentielles au déploiement du solaire thermique est le stockage de chaleur. Les stockages à changement de phase (absorption, adsorption) et thermo-chimique sont des pistes intéressantes notamment pour leur compacité et leur promesse de pertes très faibles. Ces technologies émergentes font l'objet de travaux de R&D, notamment coordonnés par le programme Solar Heating & Cooling de l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA SHC). Des efforts de recherche sont à fournir pour :

- Caractériser le comportement et les performances des réactifs,
- Comprendre les facteurs d'influence sur la densité de stockage et sur la dégradation des matériaux,
- Produire des méthodes fiables de détermination du niveau de stockage des systèmes,
- Développer le savoir-faire d'optimisation des systèmes de stockage...

Usages directs

Si le solaire thermique est principalement connu pour ses applications indirectes, il existe aussi des essais pour intégrer le solaire thermique au cœur des procédés. Par exemple, la société Panatere, en Suisse, expérimente le recyclage d'acier et de titane par fusion à l'aide d'une **centrale solaire** pouvant en théorie atteindre les 3 500 °C. Les centrales solaires font notamment l'objet de recherches concernant l'amélioration de leurs performances et la gestion de l'intermittence via des outils de pilotage optimisés entre production et stockage.

Biomasse & Combustibles Solides de Récupération

Le récent rapport du Secrétariat Général à la Planification Écologique (SGPE) sur la disponibilité de la biomasse (juillet 2024) prévoit une forte concurrence des usages en 2050. Si les usages énergétiques ne sont pas jugés prioritaires, certains secteurs ayant peu d'alternatives dépendent d'innovations dans le domaine :

- Bien que plutôt associées aux problématiques de production d'énergie, la **pyrogazéification**, la **gazéification hydrothermale** ou la **torréfaction** adressent aussi des enjeux d'intégration de la biomasse dans les procédés. En effet, le développement de ces solutions émergentes pourrait ouvrir la porte à une diversification des biomasses valorisables, et à l'amélioration de leurs rendements de conversion énergétique.
- L'amélioration des solutions de **traitement des polluants** émis à la combustion, afin d'élargir les gisements valorisables au bois B, bois C, résidus de biomasse, huiles et graisses, etc. pourrait ainsi élargir les sources d'énergie.



Captage et valorisation du CO₂

Une partie des émissions de CO₂ de l'industrie restera inévitable : d'une part, des contraintes techniques et économiques freineront la décarbonation à 100% de la production d'énergie et la rationalisation maximale de tous ses usages. D'autre part, certains procédés tels que la fabrication de chaux impliquent des réactions chimiques intrinsèquement émettrices de CO₂, ce sont les émissions directes. Pour abattre ces gisements résiduels d'émissions de CO₂ et pour espérer compenser les émissions passées, des espoirs importants sont placés dans le captage et la valorisation du CO₂ (CCU : Carbon Capture and Utilisation), thématiques sur lesquels les travaux de recherche se multiplient.

Captage de CO₂

Le captage de CO₂ dans les fumées industrielles peut être traité par deux approches :

- La purification des intrants en amont de la combustion, de sorte à obtenir du CO₂ en forte concentration en sortie. Des solutions telles que la **gazéification** ou l'**oxycombustion** en cours de développement. L'oxycombustion en particulier fait encore face à plusieurs verrous : les installations existantes sont inadaptées à la corrosion provoquée par l'oxygène, aux pics de température pouvant se produire lors de la combustion, et aux volumes de fumées fortement réduits.
- Le captage sélectif de CO₂ dans les effluents gazeux complexes récupérés en aval de la combustion.



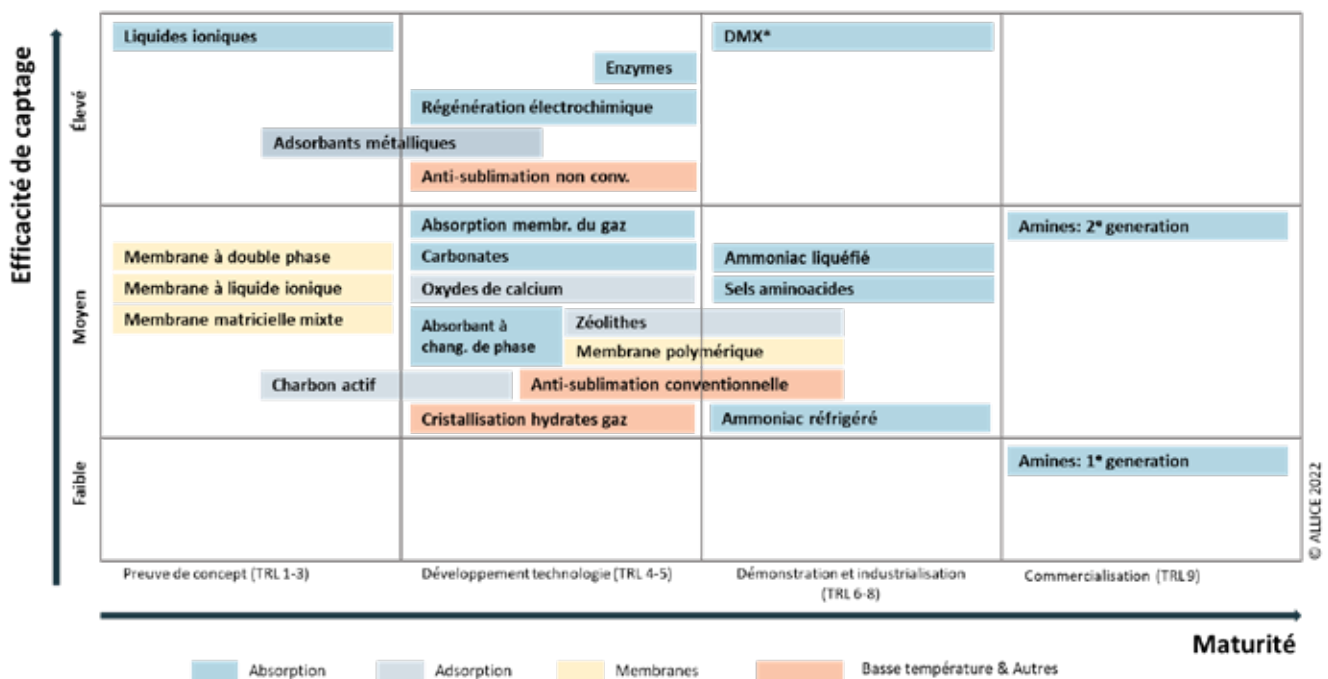
Focus sur le captage sélectif de CO₂

Quatre grandes familles de technologies explorent la seconde approche : l'absorption, l'adsorption, la filtration membranaire et la cryogénie. Au sein de ces familles, chaque technologie fait face à des défis propres, mais dans l'ensemble, nous pouvons souligner que :

- **L'absorption et l'adsorption** sont plus matures mais présentent encore des limitations importantes pour s'adapter à la présence de polluants communs (SOX, particules, etc.). L'étape de régénération du solvant ou de l'adsorbant y est également très énergivore.
- **La filtration membranaire** ne fonctionne que sur des fumées déjà concentrées en CO₂ (taux > 15%), ce qui implique des étapes de prétraitement des fumées.
- **La cryogénie** nécessite une consommation énergétique conséquente pour abaisser la température des fumées de plusieurs centaines de degrés.

Par ailleurs, la recherche bat son plein et les multiples technologies explorées varient fortement en maturité technologique et en efficacité du captage (% du CO₂ total capté).

Les technologies de captage de CO₂, par efficacité de captage et maturité



Valorisation de CO₂

À l'instar du captage, la valorisation du CO₂ peut s'envisager de multiples manières et fait l'objet d'explorations très diverses.

Quatre grandes voies de valorisation sont identifiées :

1. L'utilisation directe, en tant que réfrigérant en agriculture ou Industrie Agro-Alimentaire ou pour des applications très spécifiques.

Cette voie est anecdotique : le CO₂ utilisé nécessite une grande pureté (>99,7%), et la demande nationale ne dépasse pas les 400 kT/an.

2. La minéralisation, c'est-à-dire la production de carbonates inorganiques, très utilisés dans la fabrication de matériaux de construction, dont le béton et l'asphalte.

Les technologies de minéralisation présentent des avantages considérables : elles se contentent de fumées directement issues de combustion (sans purification), opèrent à température et pressions ambiantes, et ouvrent la porte à des débouchés de gros volume et des temps longs d'immobilisation du CO₂. Des projets pionniers de production de carbonates de calcium à l'échelle industrielle, comme ceux de Carbon8, démontrent également une maturité avancée de certaines solutions. Pourtant, restent à relever les défis de mieux comprendre et maîtriser les chaînes de réactions intermédiaires en jeu dans les procédés, limiter les besoins en additifs et valoriser les coproduits générés.

3. La conversion chimique, vaste domaine regroupant notamment l'hydrogénation et la synthèse organique.

► **L'hydrogénation**, directe ou indirecte, permet de produire des carburants (méthane, méthanol, hydrocarbures) à partir de CO₂ et d'hydrogène. Si l'hydrogénation directe est

plus mature (en atteste le projet C2Fuel à Dunkerque), les freins sont encore nombreux : le procédé s'effectue à hautes pressions et température, est très consommateur en hydrogène (donc en électricité) et en eau, et ne se satisfait aujourd'hui que de CO₂ à haut niveau de pureté.

► **La synthèse organique** présente autant de pistes d'innovation que de molécules d'intérêt recherchées. Les industriels y portent leur attention par exemple pour la production de molécules alternatives à des réactifs toxiques tels que le bisphénol A. Les procédés les plus aboutis comme la production de polyols ou de polycarbonates voient déjà naître des projets à l'échelle industrielle, portés par des acteurs comme Covestro, Repsol ou Norner. Cependant, le niveau de pureté de CO₂ exigé, de l'ordre de ceux des applications alimentaires, est un frein majeur à la généralisation de ces usages.

4. La conversion biologique, telle que la méthanation biologique, la production de lipides et protéines pour l'alimentation animale, de biodiesel (micro-algues) ou de bioéthanol (cyanobactéries).

Ces pistes sont à des stades de développement peu avancés, et le champ de la recherche dans le domaine est encore très vastement ouvert. On peut citer le projet pionnier CimentAlgue, fruit d'une collaboration entre chercheurs et industriels français, visant à démontrer la viabilité de la culture d'algues alimentées par la chaleur et le CO₂ issu des cimenteries, pour produire des carburants de 3^{ème} génération.



AU-DELÀ DE LA TECHNOLOGIE, LES INNOVATIONS MÉTHODOLOGIQUES

La nécessité d'une vision d'ensemble

Quel que soit le type de technologies et de leviers de décarbonation envisagés pour un site industriel, il est crucial de les intégrer dans une approche globale afin de garantir la pertinence et l'optimisation de la solution proposée. Il est donc nécessaire de développer des méthodes :

Pour évaluer l'impact des solutions déployées

Toujours plus de données précises sont nécessaires pour alimenter les méthodes d'évaluations telles que l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) ou le bilan carbone. La méthodologie même de l'ACV doit évoluer pour prendre en compte des contextes tellement innovants qu'ils ne peuvent être comparés aux situations de référence existantes. La quantification des impacts des technologies doit tenir compte d'un nombre grandissant de paramètres pour garantir la pertinence globale de la solution. Si les critères économiques et d'émissions GES sont aujourd'hui les principaux, il faut pouvoir anticiper et évaluer les impacts sociologiques, sur la biodiversité, sur le cycle de l'eau...

Pour optimiser leur intégration dans les processus existants

Les méthodologies d'analyse systémique permettent une optimisation globale du processus industriel. Elles doivent être à même d'intégrer l'ensemble des nouvelles technologies et vecteurs énergétiques pour répondre au besoin d'aide à la décision des industriels dans la construction de leur feuille de route de décarbonation. De même, pour s'assurer que l'ensemble des contraintes d'impact sont respectées, des modèles mathématiques d'optimisation multicritères doivent être développés.



Enjeux d'observabilité des équipements

Ces innovations méthodologiques ne peuvent être mises en œuvre qu'avec des données de plus en plus variées, et surtout fiables. Cela nécessite des avancées sur toute la chaîne de mesure : des capteurs aux logiciels de modélisation, en passant par les outils de suivi et de pilotage. L'émergence des jumeaux numériques, qui permettent un suivi et une projection en temps réel, représente l'aboutissement d'une visualisation détaillée du procédé.

Innovations macro-économiques

Enfin, les enjeux du XXI^{ème} siècle, parmi lesquels celui de la décarbonation de notre économie, sont l'occasion de questionner jusqu'à notre manière d'innover et notre manière de produire de la valeur.

L'innovation frugale aussi appelée «jugaad» ou «low-tech», dont l'Inde s'est fait la championne, fait petit à petit son chemin dans les milieux de la R&D occidentale. Cette innovation par la contrainte permet de répondre aux besoins d'aujourd'hui et de demain avec des matériaux et produits à faibles besoins en matière première et en énergie, et dont la revalorisation en fin de vie est facilitée.

Un nombre croissant d'industriels se tourne aussi vers **l'économie de la fonctionnalité**, transformant leur modèle fondé sur la vente d'un produit en un modèle de vente d'un service. Particulièrement présent chez les fournisseurs d'installations solaires thermiques ou de récupération de chaleur, ces modèles incitent les offreurs de solution à maximiser la durabilité de leurs équipements, et ouvrent la porte à de nouveaux montages d'exploitation et financier susceptibles de faire tomber les barrières économiques à l'adoption de ces solutions innovantes.

- Présentation « La planification écologique de l'industrie », SGPE, 2023
- L'énergie, un poste clé dans l'industrie, ADEME, 2017
- Plans de transition Sectoriels de l'ADEME, <https://agirpoulatransition.ademe.fr/entreprises/demarche-decarbonation-industrie/plans-transition-sectoriels>
- Méthodologie d'intensification et sécurité des procédés, Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse, <https://lgc.cnrs.fr/recherche/stpi/methodologie-dintensification-et-securite-des-procedes/>
- Étude « Potentiel d'intégration des gaz décarbonés dans l'industrie », ALLICE, 2022
- Rapport « La chaleur fatale », ADEME, 2017
- État de l'art « Solutions contre l'encrassement des échangeurs pour une récupération de chaleur optimale », ALLICE, 2024
- Étude « Le traitement des fumées comme vecteur de récupération de chaleur », ALLICE, 2024
- Étude « Potentiel d'électrification des procédés thermiques industriels », ALLICE, 2021
- État de l'art « Pompes à chaleur très haute température pour l'industrie », ALLICE, 2021
- Étude « Hybridation énergétique des procédés industriels », ALLICE, 2024
- Étude « Potentiel du solaire thermique dans l'industrie », ALLICE, 2023
- Task 58 de l'IEA SHC, <https://task58.iea-shc.org/about>
- Task 67 de l'IEA SHC, <https://task67.iea-shc.org/about>
- Site du laboratoire PROMES, <https://www.promes.cnrs.fr/>
- Dossier « De la biomasse aux molécules et matériaux innovants », INRAE, 2022, <https://www.inrae.fr/dossiers/biomasse-aux-molecules-materiaux-innovants>
- Note « Baisser la teneur en clinker des ciments : point d'étape sur l'activation de ce levier de décarbonation », France ciment, 2024, https://www.france-ciment.fr/wp-content/uploads/2024/04/FRANCE_CIMENT-NOTE-Facteur_clinker-avril_2024.pdf
- Rapport « Vulnérabilité des approvisionnements français et européens », Trésor-Eco n° 274, 2020, Direction générale du Trésor du ministère de l'économie, des finances et de la relance
- Étude « Potentiel du captage et de la valorisation du CO₂ pour la décarbonation », ALLICE, 2022

QUELS ENJEUX POUR LA FRANCE ?



Hoang BUI

Coordinateur des Stratégies Nationales d'Accélération (SNA) «Hydrogène Décarboné» et «Décarbonation de l'Industrie» au Secrétariat Général Pour l'Investissement

L'Etat a mis en œuvre 18 SNA dont l'une porte sur la décarbonation de l'industrie, quels sont les enjeux associés à cette stratégie ?

La stratégie nationale de décarbonation de l'industrie est une stratégie phare de l'État qui bénéficie d'un budget de **4,5 milliards d'euros**. Ces montants sont conséquents car le choix a été fait de financer à la fois le domaine de la recherche mais aussi les CAPEX/OPEX des grandes industries qui sont engagées dans un processus de décarbonation. L'objectif est donc d'encourager les sites industriels à se décarboner pour pérenniser les capacités de production stratégique sur notre territoire : les pressions réglementaires sont de plus en plus fortes sur le plan environnemental et cela nécessite la modernisation des équipements mais aussi des investissements dans certaines technologies, par exemple l'électrification des procédés ou l'utilisation d'hydrogène décarboné, qui ne sont pas souvent rentables à ce jour.

Ce soutien à la décarbonation s'adresse prioritairement aux industries de la sidérurgie, de la chimie, de la production d'engrais, de verre ou de ciment, et également de l'agro-alimentaire qui sont des grands émetteurs de gaz à effet de serre.

L'ambition est donc de préserver nos sites industriels actuels et aussi de développer un écosystème de l'offre qui permette d'asseoir la réindustrialisation en France par la création de nouvelles entreprises actives dans les solutions de décarbonation et le développement de compétences associées.

Comment percevez-vous le rôle de la recherche et de l'innovation afin de relever ces enjeux ?

Au sein de cette SNA, le financement des projets de recherche a pour objectif de **développer des solutions technologiques plus performantes et plus durables, qui, nous l'espérons, amèneront à terme des solutions rentables pour les industriels.**

En effet, les solutions actuelles qui s'appuient sur des optimisations de procédés existants présentent aujourd'hui leurs limites car il s'agit d'aller chercher de nouveaux gains énergétiques de plus de 20% ou de réduire les émissions de plus de 1 000 tonnes équivalent de CO₂ par an. Ce sont des sujets complexes qui mêlent des défis portés à la fois sur les procédés de production, les intrants utilisés, le mix énergétique ou encore la capture et la valorisation ou stockage du CO₂.

L'électrification des procédés est un levier puissant dans la décarbonation mais elle n'est parfois pas suffisante : le procédé de production lui-même se doit d'être plus performant et économe en énergie car l'électricité décarbonée reste encore une denrée rare à préserver. Les chaleurs fatales doivent être évitées ou valorisées : l'enjeu des solutions de récupération énergétique aux rendements optimisés reste fort.

Dans certains procédés, il y aura toujours des émissions de CO₂, il s'agit donc de mettre en œuvre des solutions de capture de CO₂ (CCS) avec un enjeu énergétique fort : la recherche doit nous permettre de proposer des solutions de captage plus performantes et, par ailleurs, de développer des solutions de valorisation de ce carbone capté par la production de molécules d'intérêt. **C'est bien pour aller plus loin sur ces enjeux et offrir des leviers de décarbonation soutenables économiquement que des solutions de rupture issues de la recherche sont attendues.**



Dans le cadre des SNA, il y a plusieurs champs d'intervention dont l'appel à projets pré-maturation/maturation, quelles sont les ambitions de ce dispositif de financement ?

Cet appel à projets amène une brique complémentaire de financement pour permettre l'accélération vers le transfert industriel. Il faut bien avoir en tête que nous parlons d'innovations à mettre en œuvre sur des procédés industriels nécessitant des investissements lourds, qui tournent notamment en continu et dont la performance ne doit pas être altérée.

Pour pouvoir diffuser ces nouvelles solutions, il faut donc répondre aux besoins précis de l'industrie tout en veillant à minimiser les risques liés au changement pour les industriels, qui ne peuvent pas supporter des arrêts multiples liés à un procédé non maîtrisé. C'est tout cela qui est attendu via ces programmes de prématuration/maturation qui constituent une première étape cruciale vers l'industrialisation et vers le marché. Cet investissement doit se faire dans la durée car ce type de solution se déploie sur plusieurs années et a donc besoin du soutien public.

En tant que coordinateur national comment percevez-vous le dispositif CACTUS et quels sont les résultats attendus ?

L'objectif premier du dispositif est d'apporter aux industriels des innovations de rupture ou incrémentales avec des gains et performances beaucoup plus importants que ce que la R&D interne des grands groupes et des acteurs d'ingénierie peut apporter à court terme. Par exemple, sur les sujets comme la co-électrolyse du CO₂. D'autres sujets abordés seront peut-être un peu moins en rupture comme étudier de manière plus précise comment l'énergie fatale peut être évitée ou récupérée : il s'agit pour la recherche d'aborder ces sujets en revenant à la science, pour découvrir de nouvelles solutions.

Si l'on regarde l'ambition de la SNA, elle est de réduire les émissions de CO₂ de 27 millions de tonnes entre 2022 et 2030, sachant que l'industrie française a émis 73 millions de tonnes de CO₂ en 2022. L'enjeu est donc considérable, il s'agit en moins de 30 ans d'adapter et de changer nos modes de

production fondés depuis presque 200 ans sur les énergies ou intrants issus du fossile, comme le charbon et le pétrole.

En soutenant et finançant des projets de prématuration et maturation technologique, nous investissons, parfois, sur une échelle de temps qui va au-delà de 2030 car parvenir à la maturité industrielle peut demander du temps. C'est pourquoi, il est important d'investir dès aujourd'hui sur le long terme pour aller chercher les réponses technologiques et industrielles à notre problématique de protection du climat et de transition soutenable. Je suis très satisfait du démarrage de ce programme CACTUS qui permet de sélectionner les meilleurs projets ayant un impact sur le long terme avec des promesses d'innovations majeures pour l'industrie et la transition climatique.

Quel message souhaiteriez-vous faire passer en priorité aux chercheurs ?

Aujourd'hui, l'État est prêt à prendre des risques, nous mettons à disposition des enveloppes de financement significatives et nous comptons sur les équipes de recherche pour développer des innovations de rupture ou incrémentales sur les filières prioritaires et les plus émettrices de GES qui n'ont pas les solutions de décarbonation performantes et soutenables économiquement. Nous souhaitons assurer le continuum d'intervention de l'amont à l'aval, jusqu'au déploiement des solutions de décarbonation françaises dans l'industrie.

Il peut y avoir des échecs en intervenant à bas TRL et ce n'est pas un problème, **l'important est de soutenir les projets à forts potentiels et de partager les risques.** Notre intérêt à tous est d'accélérer les démarches et de donner les moyens pour un transfert industriel efficace. Dès lors que votre projet adresse les défis de décarbonation et vient répondre à des demandes sans offre soutenable ou vient challenger les solutions existantes en apportant de meilleures performances, le consortium CACTUS est prêt à vous soutenir.

Les chercheurs peuvent également donner naissance à des startups deeptech qui constituent de nouveaux écosystèmes industriels innovants grâce à des projets notamment TRL 5 et 6, que nous pouvons ensuite accompagner au travers des aides opérées par l'ADEME ou Bpifrance.

LES APPORTS ATTENDUS DE LA RECHERCHE



Fabrice LEMOINE

Co-directeur Programmes et Équipements Prioritaires pour la Recherche (PEPR) SPLEEN - CNRS

Vous êtes chercheur à l'Université de Lorraine au sein d'une UMR Université-CNRS et coordinateur du PEPR SPLEEN sur la décarbonation de l'industrie, quel parcours vous a amené vers cette thématique ?

Je travaille depuis longtemps sur la thématique de la conversion de l'énergie, à la fois sur le domaine de la recherche et de la formation. J'ai démarré ma carrière de chercheur autour des sujets d'étude et d'optimisation des transferts de chaleur et de masse à petite échelle, pour travailler au fur et à mesure sur des systèmes de plus en plus gros. J'ai d'abord été appelé à m'impliquer au sein de l'alliance ANCRE (Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie) en tant que représentant de la CPU (France Universités), j'en ai présidé le comité de pilotage pendant 2 ans, ce qui m'a amené à bien connaître les sujets de décarbonation de l'industrie et les communautés associées. Ceci m'a permis de m'investir pour répondre à la feuille de route demandée par l'État sur la décarbonation de l'industrie et de travailler à la construction du PEPR SPLEEN, pour le compte du CNRS.

Quels champs de recherche couvre le PEPR SPLEEN ? Quel sont les enjeux associés ?

Pour décarboner l'industrie, nous pouvons présenter **2 grands enjeux associés** : le **premier passe par la décarbonation du mix énergétique industriel et le second par l'amélioration de l'impact carbone des procédés de conversion de la matière et de l'énergie**. Les 3 typologies d'industries les plus concernées sont celles du secteur de la métallurgie, du ciment et de la chimie. Les procédés peuvent être améliorés, intensifiés et optimisés : par exemple dans le cadre des procédés de conversion chimique, il est possible de travailler sur de l'ingénierie catalytique et de rendre les réactions réalisables à plus basse température et d'avantages sélectives, ce qui permet finalement d'économiser de l'énergie et de la matière.

Il s'agit également d'introduire la notion de **circularité du carbone**, puisque certains procédés, une fois optimisés, émettront toujours du CO₂. L'enjeu est alors de le capter par un procédé qui doit être le moins énergivore possible et de le valoriser en développant des produits et matériaux à base de carbone non fossile : des combustibles, des molécules ou encore des carbonates, soit des polymères. En réalité, l'objectif n'est pas de décarboner mais bien de défossiliser le carbone dont on a besoin.

Ce carbone peut également être séquestré de manière pérenne dans les sous-sols, les questions socio-techniques liées au stockage onshore est également un sujet qui relève du PEPR.

Enfin, il faut veiller à ce que ces procédés de captage et de conversion du CO₂, qui consomment, et qui ont des besoins importants en énergie, ne viennent pas proposer un



bilan carbone plus lourd que des solutions fossiles existantes, car l'énergie reste encore aujourd'hui majoritairement carbonée. Il convient donc de développer des métriques et des indicateurs qui permettent d'évaluer au mieux les procédés et de montrer qu'il y a bien eu un progrès en terme de décarbonation.

Les programmes de recherche du PEPR adressent ces différents enjeux et se répartissent ainsi sur 4 axes :

- **la décarbonation du mix énergétique et l'amélioration de l'efficacité énergétique,**
- **l'amélioration des procédés en termes d'efficacité matière et énergétique, y compris pour les procédés de capture du carbone CO₂, c'est ce qu'on appelle l'intensification des procédés,**
- **l'utilisation ou le stockage du CO₂,**
- **le développement d'indicateurs et la métrologie des émissions associées à ces procédés.**

Ces différents sujets sont menés à la fois en parallèle et en synergie au sein du PEPR car certains croisements technologiques peuvent générer de nouvelles innovations et le dernier axe cité sur la recherche de métriques se veut quant à lui par nature transversal.

Comment collaborez-vous avec le consortium CACTUS et en quoi ces programmes sont-ils complémentaires ?

La complémentarité entre les deux dispositifs a été pensée dans le cadre de la construction même de la SNA puisque le programme CACTUS doit pouvoir accompagner les projets de recherche soutenus par le PEPR SPLEEN sur la voie de valorisation jusqu'au transfert de technologie à travers les phases de prématuration et maturation. Le passage d'un programme à l'autre devrait être la voie naturelle de ces projets. Les priorités du programme CACTUS sont cohérentes avec les axes du PEPR et nous avons, du côté PEPR, un objectif d'apporter une quarantaine de dossiers sur ces phases de prématuration.

La coopération entre les programmes est en cours, les synergies sont encore à affiner, il reste toujours un enjeu de rendre bien lisible le dispositif pour les chercheurs. Il faut donc bien communiquer sur les modalités d'accompagnement.

Pourquoi un chercheur devrait-il candidater au programme CACTUS ?

La prématuration permet de franchir un premier cap afin de concrétiser l'innovation et d'envisager sa voie de valorisation et la maturation permet d'aller encore plus loin en allant jusqu'à un pré-produit, voire un produit. **Le chercheur doit y voir l'intérêt de transformer sa recherche en produit ayant potentiellement un fort impact.**

Le contexte général de réindustrialisation de l'Europe est particulièrement propice, les sujets de décarbonation qui ont un besoin fort de R&D offrent la possibilité de créer de la valeur sur ces nouvelles filières de décarbonation à construire en lien avec les besoins industriels. Il y a par exemple sur toute la chaîne de valeur de la capture du CO₂ des opportunités pour des nouvelles solutions à développer que ce soit sur des équipements technologiques ou du soft (concepts, dispositifs d'optimisation). Nous cherchons à favoriser les interactions avec les utilisateurs finaux (end-users) pour que les chercheurs se nourrissent également de cette mobilisation pour la décarbonation.

LES APPORTS ATTENDUS DE LA RECHERCHE



Antonio PIRES DA CRUZ
Co-directeur du PEPR SPLEEN et
Représentant IFPEN au sein du consortium
CACTUS

Vous êtes chercheur au sein de IFPEN et en charge de la direction partagée du PEPR SPLEEN, pouvez-vous nous préciser quel rôle joue IFPEN au sein de la SNA décarbonation de l'industrie ?

IFPEN, en tant qu'organisme national de recherche actif sur la transition énergétique, a participé activement aux côtés du CNRS à la construction des objectifs et du plan d'actions du PEPR SPLEEN sur la décarbonation de l'industrie. Un travail important pour fédérer la communauté des chercheurs autour de ce sujet a été réalisé afin de construire ensemble cette feuille de route. Pour ma part, je travaille depuis 20 ans à IFPEN et je suis aujourd'hui en charge des programmes de développement de solutions pour produire des carburants « bas carbone », à faible empreinte environnementale, dans la business unit « Produits Énergétique », avec notamment un programme important sur la décarbonation et la digitalisation des procédés. La recherche et l'innovation sur la conversion du CO₂ fait partie de ce programme et c'est pour cela que m'a été confiée la mission de pilotage du PEPR en partage avec le CNRS.

Nos axes de recherche sont également applicatifs et c'est donc dans la même logique que nous sommes partie prenante du consortium CACTUS.

Pouvez-vous nous décrire les axes de recherche et les priorités de IFPEN sur ces enjeux ?

IFPEN est impliquée sur plusieurs enjeux associés au domaine de la décarbonation. En premier lieu, **nous cherchons à développer des solutions nouvelles autour du captage du CO₂**, qui est un axe important de cette SNA puisque, malgré le travail réalisé sur l'efficacité énergétique et l'intensification des procédés, de nombreuses industries resteront émissives et ne pourront se passer de la combustion de produits fossiles : nous travaillons sur ce sujet de manière très proche des besoins industriels.

Le second axe est celui du stockage du CO₂, certaines de nos équipes étudient les voies de stockage géologique, notamment les méthodes d'injection dans ces espaces de stockage et également les enjeux d'intégrité de ces réservoirs. Une des voies explorées porte notamment sur la minéralisation du CO₂ au sein des sols et sous-sols, c'est ce que l'on appelle le stockage diffus.

Au-delà du stockage, nos équipes travaillent aussi à la **valorisation de ce CO₂ capté**. Ce dernier peut par exemple être couplé avec de l'hydrogène renouvelable ou bas carbone pour produire des carburants durables. Nous travaillons donc sur la chaîne complète de procédé de transformation de ce CO₂ que ce soit en carburant durable ou en composant carboné intermédiaire de la filière chimie (produits de base pour la filière plastique, textile ou autres...).



Enfin, nous contribuons à l'axe de recherche autour de la **réduction des émissions de CO₂ et l'efficacité énergétique** du transport et des procédés par l'étude et l'optimisation respectivement des systèmes de combustion et des systèmes de transferts de chaleur.

Avez-vous des « success stories » de valorisation à partager sur cette thématique ?

La valorisation de nos travaux de recherche est au cœur de notre ADN et nous travaillons en grande proximité avec les industriels. Nous pouvons travailler à bas TRL avec certaines startups qui recherchent une expertise complémentaire sur les procédés, par exemple, sur de nouvelles technologies de conversion de CO₂ et sur les axes évoqués précédemment, nous allons jusqu'à développer nos propres démonstrateurs. Sur les domaines des carburants durables et de la chimie durable, la valorisation de nos travaux est notamment portée par notre filiale AXENS. La concrétisation de toute la chaîne de développement des procédés E-fuels devrait voir le jour d'ici 4 ou 5 ans via le projet Take Kair qui réunit HYNAMICS, EDF, HOLCIM, AIR France-KLM, Axens et IFPEN : une future usine de production d'E-fuels devrait permettre d'alimenter la filière aéronautique via la valorisation du CO₂ produit par l'industrie cimentière.

Sur la partie captage de CO₂, **nous avons construit un démonstrateur qui capture jusqu'à 1000 tonnes de CO₂/an** sur le site d'Arcelor Mittal à Dunkerque. Sachant qu'il conviendrait de pouvoir capter jusqu'à 1 million de tonnes de CO₂/an sur ce type de site industriel, il est important de poursuivre nos efforts mais c'est une étape qui peut rassurer les industriels dans la capacité de la recherche à produire des solutions industrielles concrètes.

Le programme CACTUS finance des phases de prématuration et maturation, comment percevez-vous ce dispositif ? Selon vous, pourquoi un chercheur devrait-il candidater au programme CACTUS ?

Le programme CACTUS vient compléter les programmes du PEPR pour accompagner les projets vers la voie de la valorisation. L'effort d'accompagnement sur les SNA au travers du programme France 2030 est assez unique. Les communautés de chercheurs impliquées dans le PEPR ont ainsi à leur disposition des outils financiers qui leur permettent d'aller plus loin dans la concrétisation de leurs recherches et l'approche de valorisation qui passera alors par les phases de prématuration/maturation.

La contribution financière du programme est bien évidemment très intéressante et nécessaire pour poursuivre mais il n'y a pas que cet aspect à mettre en avant : **l'aide du réseau des valorisateurs (SATT, CNRS Innovation et autres cellules de valorisation des établissements) vient structurer et enrichir le projet.** Ils permettent de créer du lien avec d'autres acteurs de l'écosystème et permettent ainsi à une innovation initiée en laboratoire d'aller jusqu'au marché. La montée en échelle TRL est fondamentale pour porter une innovation sur un marché et les chercheurs doivent être accompagnés tout au long de ce processus.

LA RECHERCHE AU SERVICE DE LA VALORISATION DU CO₂



Florent BOURGEOIS

Professeur et Chercheur au Laboratoire de Génie Chimie Toulouse

En quelques mots, quel est votre domaine de recherche ?

J'ai une formation d'ingénieur matériaux doublée d'un doctorat de l'Université d'Utah dans le domaine de la valorisation des minerais. Après plusieurs années passées aux USA et en Australie, j'ai commencé à appliquer mes compétences en procédés de traitement de minerais au service de la valorisation des déchets, miniers et industriels au BRGM. Au début des années 2000, les sujets de recherche portaient davantage sur le stockage géologique du CO₂ et progressivement nous nous sommes intéressés en parallèle à la valorisation possible du CO₂, notamment par la minéralisation. Ma recherche au LGC, que j'ai rejoint en 2006 comme enseignant-chercheur, s'inscrit ainsi dans le prolongement direct de mes activités passées, avec toutefois une dominante vers les procédés de co-valorisation de déchets et du CO₂ sur ces 10 dernières années.

Selon vous, en quoi est-ce impactant d'orienter ses travaux vers la SNA « Décarbonation de l'industrie » ?

La décarbonation de toutes les activités

humaines est une priorité à laquelle nous, les humains, devons impérativement et très rapidement apporter des solutions pour limiter notre contribution au changement climatique. Les industries sur lesquelles reposent notre société et modes de vie sont un des émetteurs majeurs de CO₂. Le développement de l'offre de solutions technologiques qui peuvent contribuer à les décarboner, tout ou partie, constituent un levier d'action évident auquel, avec mes collègues, nous nous efforçons de contribuer par nos travaux sur la minéralisation du CO₂. La minéralisation du CO₂ est en effet un mécanisme naturel de régulation du carbone qui permet de le stocker et de l'utiliser sous une forme thermodynamique stable à l'état de carbonates. La nature opère cependant cette transformation sur des temps géologiques très longs : notre objectif est de développer des procédés qui reproduisent ce phénomène naturel en accélérant sa cinétique, et sans pénalité énergétique excessive.

Après des années de recherche sur ce sujet sans cadre structurant ni objectif de mise en œuvre affiché, la « SNA Décarbonation de l'industrie » me paraît être une réponse structurante que les chercheurs attendaient pour concentrer et guider leurs efforts sur cette thématique, dans une perspective réellement applicative.

Quels projets d'innovation portez-vous sur cette thématique « Décarbonation » ? Certains projets ont-ils déjà pu être transférés vers l'industrie ? Quelle expérience en avez-vous tirée ?

Après des recherches à caractère générique autour du processus de minéralisation du CO₂, nous concentrons aujourd'hui nos travaux vers la recherche de procédés capables de co-valoriser des déchets solides et du CO₂ produits par l'industrie pour fabriquer des produits utilisables, dans le secteur de la construction essentiellement. Les déchets en question sont aussi variés que les scories



de l'industrie pyrométallurgique du nickel, les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ou encore les déchets de déconstruction.

Nous n'avons pas encore pu transférer nos développements vers l'industrie mais nous n'avons jamais été aussi proches de le faire dans la mesure où nous avons la chance aujourd'hui de conduire nos recherches en partenariat avec des entreprises qui affichent des ambitions fortes pour la mise en œuvre de solutions concrètes de décarbonation. Je pense notamment au développement d'un procédé de recyclage de déchets de déconstruction avec le groupe IMERYS pour la production de carbonate de calcium précipité dans le cadre du projet PRECIZE (financement ADEME AAP DEMIBaC, plan FRANCE 2030), ou encore le projet de maturation ECOCARB financé par la SATT Toulouse Tech Transfer (TTT) et l'entreprise HOLCIM sur le recyclage des déchets de béton de déconstruction, soutenu par le dispositif CACTUS. Il s'agit bien de 2 projets dans lesquels nous mettons à profit l'expertise que nous avons acquise en minéralisation du CO₂ au service de développements industriels qui ont une vraie chance de voir le jour.

CACTUS finance les projets de prématuration/maturation et un de vos projets bénéficie de ce soutien, comment percevez-vous ce nouveau dispositif ?

Le projet de maturation ECOCARB mentionné précédemment bénéficie effectivement d'un co-financement du dispositif CACTUS, sous le titre « procédé de carbonatation de granulats de bétons préalablement micro-fracturés par micro-ondes ».

Nous percevons cette labellisation de notre projet comme une reconnaissance de l'intérêt porté à nos travaux et une confirmation qu'ils ont leur place dans la feuille de route stratégique nationale de décarbonation. Cela nous procure de la confiance et nous encourage encore plus à chercher à concrétiser nos résultats sur le terrain, même si la route est longue et l'ascension de l'échelle TRL difficile et incertaine.

Selon vous, qu'est-ce qui motive les chercheurs à faire du transfert de technologies ?

Cette motivation est certainement variable selon les chercheurs. Cependant, cela fait explicitement à mon sens partie de nos missions. Bien sûr, il convient d'éviter les segmentations entre recherche fondamentale et recherche appliquée et il faut des financements sur toute la chaîne de valeur car l'amont vient nourrir l'aval. Réciproquement, bien comprendre les problématiques actuelles des industriels en matière de décarbonation permet aussi d'adapter les voies de recherche.

Je pense que les SNA sont un signe que les attentes de la France vis-à-vis du transfert de technologies sont en pleine évolution, ce dont je me réjouis. Quoi qu'il en soit, à titre personnel, ma motivation repose sur une concrétisation visible et positivement impactante des recherches que je conduis avec mes collègues au sein du Laboratoire de Génie Chimique. **Contribuer à la mise en œuvre de filières industrielles plus vertueuses anime mon quotidien de chercheur.**

Pourquoi un chercheur devrait-il candidater au dispositif CACTUS ?

Le dispositif CACTUS s'adresse au chercheur qui bénéficie déjà d'un soutien de prématuration ou de maturation, ce qui signifie qu'il est déjà accompagné par un organisme de valorisation, une SATT par exemple. Dans mon cas, c'est la SATT Toulouse Tech Transfer, qui a géré le dépôt du dossier de candidature au dispositif CACTUS et cela a été d'un fort soutien. L'accompagnement de la SATT sur cette phase de maturation est essentiel pour aller plus loin sur les résultats, qui in fine pourront intéresser un ou des industriels.

Le dispositif CACTUS apporte à la fois un soutien financier non négligeable au projet, car cela contribue directement à amplifier les moyens qui lui sont dédiés, et une plus grande visibilité à notre innovation en confirmant que cette dernière répond bien aux objectifs structurants de la stratégie nationale de décarbonation de l'industrie, et donc aux besoins de la filière. Cela ne peut qu'amplifier l'intérêt pour nos travaux et leur impact.

LA RECHERCHE AU SERVICE D'UNE ÉNERGIE DÉCARBONÉE



Annie COLIN

Professeur ESPCI Paris-PSL

Vous êtes chercheuse au laboratoire de Chimie, Biologie et Innovation de l'ESPCI, en quelques mots, quel est votre domaine de recherche ?

Professeur à l'ESPCI-Paris-PSL, je travaille dans le domaine de la microfluidique, qui correspond à l'étude des écoulements confinés et c'est à travers l'étude de ces écoulements, couplé à de l'électrochimie, que nous avons été amenés à travailler sur un nouveau mode de production d'énergie à partir de gradients de pH et de gradients salins. Deux axes d'application sont alors envisagés : générer de l'énergie renouvelable et décarbonée à partir d'eau salée et d'eau douce, ou à partir de la valorisation du CO₂ capté en sortie d'usine (le CO₂ vient acidifier des saumures et créer le gradient de pH nécessaire). Nous travaillons donc également sur cet axe CCUS (captage, stockage et utilisation du CO₂) de la décarbonation de l'industrie via des procédés innovants de valorisation du CO₂.

Selon vous, en quoi est-ce impactant d'orienter ses travaux vers la SNA « Décarbonation de l'industrie » ?

La transition environnementale est vraiment un problème clef que la société doit résoudre dans les années à venir. Cela passe d'abord par une politique de sobriété mais il reste des défis technologiques à gérer et les chercheurs ont donc un rôle fondamental à jouer dans le déploiement de nouvelles solutions. **Nous sommes également bien challengés par nos étudiants sur nos actions dans le domaine, ils ont envie d'être acteurs des solutions qui doivent être déployées.** L'ESPCI est fortement engagée dans un grand programme de transition environnementale qui doit permettre de former nos étudiants aux enjeux de la décarbonation de l'industrie et leur apporter le panel de connaissances théoriques associées, qui ne sont d'ailleurs pas que scientifiques. Nous allons d'ailleurs ouvrir un master exécutif dédié à l'analyse du cycle de vie en septembre 2025.

Pouvez-vous nous parler des projets d'innovation développés à l'ESPCI sur cette thématique « Décarbonation » ? Certains projets ont-ils déjà pu être transférés vers l'industrie ? Quelle expérience en avez-vous tirée ?

Nous travaillons avec un partenaire industriel dans le cadre du développement de nos solutions énergétiques à gradient salin, et cela nous aide considérablement pour passer à l'échelle. Les résultats à toute petite échelle (à l'échelle d'un pore) sont en effet loin d'être transposable : il nous a fallu retravailler les écoulements de manière globale à travers



la membrane. Le soutien de l'industriel sur ces phases de scale-up nous a permis de reconsidérer nos résultats et nous nous sommes remis au travail pour ne pas avoir des effets contreproductifs sur la génération d'énergie.

Le deuxième axe applicatif de nos travaux, à savoir sur les gradients de pH par incorporation du CO₂ évoqué précédemment et soutenu dans le cadre de CACTUS, est encore au stade de prématuration et n'a pas encore fait l'objet d'un transfert. Nous pensons cependant pouvoir développer une **solution peu coûteuse, avec des membranes moins perfectionnées et très intéressantes en termes de puissance de production d'énergie.**

CACTUS finance les projets sur les phases de prématuration/maturation, comment percevez-vous ce nouveau dispositif ? Pourquoi un chercheur devrait candidater au dispositif CACTUS ?

CACTUS, et les financements de prématuration/maturation de manière générale, permettent d'avoir une enveloppe de financement nécessaire pour avancer en TRL sur des voies de valorisation et commencer à imaginer une voie startup. En laboratoire, nous faisons émerger des idées via nos axes de recherche mais avant de pouvoir valoriser, il faut bien sûr venir dérisquer un certain nombre de sujets et aller plus loin sur les résultats. La prématuration, et ensuite la maturation, en finançant un post-doc, par exemple, permettent de mobiliser nos étudiants qui sont souvent très motivés pour porter un développement de startup. Les appels à projets de l'ANR portent davantage sur l'émergence de sujets théoriques

de rupture et ne viennent pas supporter ces phases-là : d'où l'importance d'avoir un dispositif de soutien dédié à la prématuration/maturation.

La candidature ne nous a pas paru compliquée et nous avons été conseillés par Université Paris Sciences & Lettres (PSL), notre organisme de valorisation pour la soumission au programme. La vision des experts du comité CACTUS nous a paru très intéressante.

Selon vous, qu'est-ce qui motive les chercheurs à faire du transfert de technologies ?

D'une part, il faut le valoriser dans l'évaluation des carrières des chercheurs, qui sont parfois évalués davantage sur leurs publications. D'autre part, une des clés pour avancer sur le transfert, c'est de mettre en relation le chercheur avec des dispositifs d'accompagnement à la création de startup, c'est important de trouver du soutien car le chercheur n'est pas entrepreneur. Il faut bien s'entourer !

LA CATALYSE AU SERVICE DE LA VALORISATION DU CO₂



Alessandra QUADRELLI

Directrice de recherche au CNRS

Vous êtes chercheuse à l'IRCELYON, en quelques mots, quel est votre parcours et quel est votre domaine de recherche ?

Je suis directrice de recherche au CNRS, dans l'équipe ingénierie de l'IRCELYON, avec pour sujet principal, le développement de matériaux photosensibles capables de transformer le CO₂ en molécules à valeur ajoutée sans consommation d'énergie fossile. Je me suis tournée vers le métier de chercheuse par passion pour la chimie avec l'envie de produire des nouvelles connaissances et de contribuer à la formation autour de ces nouvelles connaissances. Pouvoir associer mon travail aux enjeux de société est un élément qui me motive d'autant plus, c'est pourquoi je me suis focalisée depuis 2007 sur l'étude de la chimie de l'azote et du CO₂.

Selon vous, justement, en quoi est-ce impactant d'orienter ses travaux vers la SNA « Décarbonation de l'industrie » ?

La prise de conscience que la recherche académique autour de la transformation chimique du CO₂ pouvait jouer un rôle important

dans les politiques globales de maîtrise de ce gaz à effet de serre s'est faite, pour moi, il y a une quinzaine d'années. J'ai donc choisi, en tant que responsable de la chaire de développement durable de l'école d'ingénieurs de CPE Lyon, d'organiser le 1er évènement international CO₂ Forum en 2009 à partir de cette analyse. La particularité de ce congrès a été d'y associer à la fois les représentants et les représentantes du monde socio-économique, du monde politique et du monde académique afin de croiser les regards et les actions sur la thématique et nourrir les politiques associées.

Au-delà du stockage du CO₂, il m'apparaît aujourd'hui indispensable de penser à des solutions de circularité du carbone et d'évitement d'utilisation d'énergies fossiles **en utilisant le CO₂ comme vecteur d'énergie renouvelable**, plutôt que comme déchet à stocker. Aujourd'hui, je suis d'ailleurs impliquée au sein du PEPR SPLEEN en tant que porteuse du projet ciblé POWER CO₂, qui regroupe 26 équipes de recherche différentes sur le territoire national. L'objectif de POWER CO₂ est d'atteindre la conversion efficace de CO₂ via des énergies renouvelables en e-carburants, aussi appelés e-fuels, en carburants solaires et en produits à l'architecture complexe via des modes d'activation inusuels tels que l'activation par plasma chimique.

Enfin, je voudrais préciser que même si la réduction de notre empreinte carbone est une priorité absolue au vu de nos enjeux climatiques actuels, **il ne faudrait pas tomber dans l'écueil de trouver des solutions qui ne font que déplacer le problème avec des effets systémiques non pris en compte** (la biodiversité, l'accès à l'eau, le cycle du phosphore et de l'azote etc...). C'est une invitation à une réflexion qui nécessite la mise en place simultanée d'outils d'analyse, de cadres de réflexion et d'actions qui réussissent la décarbonation de



l'industrie et, en même temps, réussissent au-delà du périmètre défini par l'objectif de «Décarbonation de l'Industrie » stricto sensu.

Quel est votre regard sur le transfert de technologie entre le monde académique et celui de l'industrie ?

J'ai pu déposer 5 brevets sur mes sujets de recherche : des discussions poussées avec les industriels ont pu avoir lieu. Certains de mes résultats ont intéressé particulièrement un partenaire industriel qui a mené un important travail complémentaire sur plus de 8 ans avec mon laboratoire de l'époque, C2P2 et cette mise en perspective concrète m'a intéressée. Je trouve qu'à l'interface entre le métier de chercheur et de la société, le lien avec l'industrie est bien présent et est facilité par plusieurs facteurs et acteurs, dont CACTUS par exemple. Il reste cependant me semble-t-il un trou dans ma raquette à savoir être en capacité d'évaluer les impacts environnementaux et sociétaux de mes recherches. Je crois ne pas être seule dans cette difficulté ; travailler avec des industriels permet en partie d'y remédier. Il y a évidemment aussi d'autres interlocuteurs à engager dans ce travail d'études d'impacts.

CACTUS finance les projets de prématuration/maturation, comment percevez-vous ce nouveau dispositif ?

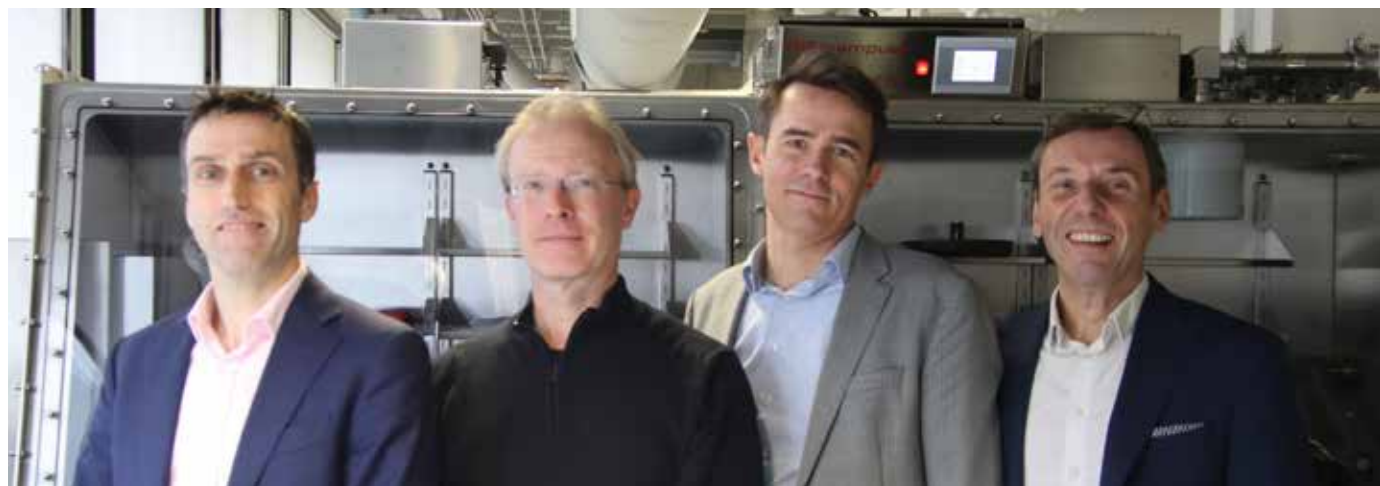
Aujourd'hui, ce dispositif démontre que le chemin est bien jalonné pour que les solutions scientifiques déployées au laboratoire puissent contribuer in fine à l'amélioration des procédés industriels. Beaucoup de maillons d'accompagnement de projets sont en place et cela permet des échanges fluides entre les différents acteurs de la SNA et d'accélérer le transfert sur ces sujets d'enjeu. Ce maillon est essentiel pour établir le lien avec l'industrie et il est important de le faire connaître aux

chercheurs dans mon rôle de pilote de projet ciblé au sein du PEPR SPLEEN.

Selon vous, qu'est-ce qui motive les chercheurs à faire du transfert de technologies ? Qu'est-ce qui pourrait amplifier cette dynamique ?

Selon moi, l'invitation à faire du transfert, et l'accompagnement nécessaire sont déjà bien présents : nos critères d'évaluation en tant que chercheurs et chercheuses passent désormais aussi par cette capacité à valoriser nos résultats via un transfert de technologies : si nous voulons avoir un impact sociétal, c'est une des pistes possibles et reconnues. De plus, les dispositifs de financement de nos recherches s'adosent très souvent à la présence d'un partenaire du monde socio-économique venant valider aux yeux de certains, dont parfois les évaluateurs et évaluatrices, l'intérêt du projet. Je suis donc, comme mes collègues, très exposée à cette approche. **Les nouveaux dispositifs de financement de prématuration/maturation vont contribuer à amplifier cette dynamique et nous sommes invités à continuer à les faire gagner en visibilité.**

NOUS CONTINUONS À TRAVAILLER AVEC LA RECHERCHE PUBLIQUE



Fondateurs SWAN-H : Steve VAN ZUTPHEN, Willem SCHIPPER, Augustin DE BETTIGNIES, Nicolas MÉZAILLES (de gauche à droite)

Steve VAN ZUTPHEN

Président de SWAN H

Pouvez-vous en quelques mots présenter votre parcours et ce qui vous a mené à créer la startup SWAN H ?

Steve VAN ZUTPHEN : Je suis chimiste de formation, j'ai déjà eu une expérience de création et développement d'entreprise dans le domaine de la récupération des métaux de 2011 à 2017. A la cession de cette première startup, je suis resté à mon compte en intervenant en appui au transfert de technologie et de la recherche. J'ai été particulièrement séduit par l'innovation portée par Nicolas MEZAILLE, chercheur du CNRS de Toulouse (LHFA), que je connaissais par ailleurs : cette innovation amenait une nouvelle méthode d'activation de l'azote pour produire de l'ammoniac. Le coté disruptif de cette technologie a vraiment été au cœur de ma motivation pour m'impliquer sur le projet : même s'il n'en était encore qu'au stade de la simple réaction chimique, j'ai tout de suite vu l'impact environnemental que nous

Augustin DE BETTIGNIES

Chief business officer chez SWAN H

pourrions avoir en cas de succès sur le passage à l'échelle, l'ammoniac étant le second produit chimique de base produit dans le monde.

Augustin DE BETTIGNIES : Pour ma part, à la suite d'un doctorat en biologie cellulaire, mon parcours m'a plutôt orienté sur le développement de technologies dans le domaine pharma/biotech et medical device. À la suite d'un parcours au sein de différentes entreprises, je me suis tourné naturellement vers l'accompagnement stratégique et financier de projets de création d'entreprises. J'ai pu ainsi rencontrer Steve et nos 2 autres cofondateurs à la genèse du projet : j'avais de mon côté à la fois ce souhait de m'affranchir d'une grande structure, ainsi qu'un besoin d'avoir un impact individuel sur la planète à travers un projet significatif.



En quoi l'activité de votre startup contribue-t-elle à la décarbonation de l'industrie ?

Steve : Le projet de SWAN H consiste à proposer une nouvelle méthode pour produire de l'ammoniac vert de manière localisée à petite et à grande échelle. Aujourd'hui, il y a 180 millions de tonnes d'ammoniac qui sont produites dont 70 à 80 % de la production est utilisée dans le secteur des engrais, mais des filières croissantes d'utilisation de l'ammoniac se développent autour du stockage et du transport de l'énergie. C'est également un composant de base pour d'autres industries de transformation.

Augustin : SWAN H se positionne sur un procédé qui est radicalement disruptif. Il existe une cinquantaine de projets au niveau mondial qui ambitionnent de verdir la production d'ammoniac mais ces projets nécessitent souvent des équipements énormes liés aux centrales photovoltaïques associées et sont ainsi décentralisés par rapport aux lieux d'utilisation de l'ammoniac. Les coûts économiques et environnementaux de ces solutions restent donc trop importants. La nôtre se différencie par le fait que **notre procédé n'a pas besoin d'utiliser de fortes températures ni de hautes pressions et peut donc s'implanter sur les lieux d'utilisation de l'ammoniac.**

Steve : Et c'est cette caractéristique qui nous permet de gérer l'intermittence des énergies renouvelables, ce que le procédé classique centenaire, dénommé HABER-BOSCH, ne sait pas faire. Cette innovation nous permet ainsi de redimensionner les équipements d'énergie renouvelable nécessaires pour verdir la production d'ammoniac sur des surfaces qui sont davantage disponibles en Europe et d'installer ainsi cette solution sur le territoire français.

Quels sont les grands enjeux liés à votre marché ?

Steve : Dans le milieu de l'ammoniac, on retrouve deux tendances : ceux qui investissent dans les projets HABER-BOSCH verts évoqués précédemment et ceux, qui par conservatisme, essaient plutôt de travailler des voies d'optimisation à la marge sans modifier leur outil industriel déjà en place : par exemple incorporer des technologies de capture de CO₂, ou encore utiliser une certaine proportion d'hydrogène vert.

Augustin : Notre approche disruptive nous amène à ce stade à nous adresser davantage aux « petits » utilisateurs d'ammoniac, qui ont intérêt à mieux contrôler leur chaîne d'approvisionnement pour diminuer leurs coûts, ces derniers ayant subi une inflation certaine sur les dernières années. La décarbonation seule n'est pas encore une motivation suffisante : ces acteurs voient d'abord dans notre solution l'intérêt de devenir autonome en approvisionnement et de ne plus subir la hausse des prix du gaz.

Quel est votre lien avec la recherche publique aujourd'hui, y a-t-il encore des verrous technologiques à lever ?

Steve : La startup est encore jeune et nous sommes toujours en cours de scale-up : notre pilote est prévu sur 2025 ou 2026. **Nous travaillons encore de manière très proche avec Nicolas et son équipe au LHFA**, à la fois sur l'appui en terme de moyens techniques, notamment d'analyse et sur le plan de l'accès aux compétences. Notre lien scientifique est fondamental : nous allons démarrer une thèse CIFRE avec le laboratoire afin de consolider la suite de notre R&D. Nous sommes encore implantés géographiquement proche du laboratoire au cœur du réseau de l'université de Toulouse : cela stimule notre roadmap technologique et facilite nos recrutements.

Comment voyez-vous le dispositif CACTUS ?

Augustin : Le rôle de CACTUS qui vient financer les phases amont de maturation est extrêmement important car **il ne suffit pas d'avoir déposé un brevet pour créer une startup. L'accompagnement jusqu'au TRL 5 est essentiel pour la réussite du projet** et ce soutien complémentaire m'apparaît donc comme une bonne chose. Il faut que la technologie soit suffisamment mûre et partiellement dérisquée avant de lancer la startup car sinon les fonds d'investissement ne suivront pas le projet.

Steve : Contrairement à l'environnement anglo-saxon que je connais par ailleurs, il reste compliqué de lever des fonds en France. Par contre, les systèmes de financement publics en place viennent compenser ces difficultés d'accès à la levée de fonds et jouent vraiment le rôle d'accélérateur pour le développement des innovations, notamment sur les axes deeptech et de décarbonation de l'industrie.

Qu'est-ce qui selon vous permettrait d'amplifier le mouvement de la création de startups auprès des chercheurs ?

Steve : Le chercheur peut être motivé par la concrétisation de son projet, c'est à dire avoir un impact au-delà du partage de connaissance lors de publication scientifique ou de conférence. Sur cette phase, il doit avant tout être bien accompagné. Un bon chercheur n'est pas forcément un bon entrepreneur et c'est normal : il ne doit pas rester seul, la structuration du projet d'entreprise est différente d'un projet scientifique.

Augustin : Les compétences en business développement et stratégie viennent compléter les compétences scientifiques et techniques. Créer du lien entre les deux types de profil en amont de la création peut générer des belles équipes. L'expérience des cofondateurs est également un atout important pour structurer la future startup, c'est par exemple ce qui nous a réuni, avec enthousiasme, chez SWAN H.



LES ENJEUX ÉNERGÉTIQUES DES PROCÉDÉS



Patrick BOUCHARD
Président de HEVATECH

Pouvez-vous en quelques mots nous présenter votre parcours et ce qui vous a mené à diriger la société HEVATECH ?

De formation ingénieur et Executive MBA HEC, j'ai eu un parcours industriel dans différents secteurs technologiques : dans le domaine de l'acoustique et vibratoire dans un premier temps, puis je me suis tourné plus spécifiquement vers les technologies liées à l'hydrogène et les piles à combustible. J'ai toujours été intéressé par l'entrepreneuriat et l'innovation, j'ai d'ailleurs dirigé le pôle de compétitivité CAPENERGIES. Fin 2015, la startup HEVATECH, qui avait été initialement créée par 3 associés aux profils complémentaires, dont un chercheur, avait alors besoin de renfort pour son développement. Ces derniers m'ont contacté pour que je vienne prendre le poste de Directeur Général et j'en assure la présidence depuis 2018.

Quel est le domaine d'activité d'HEVATECH et quel est le lien avec la décarbonation de l'industrie ?

Notre activité est en lien direct avec la décarbonation de l'industrie : **plus de 60% de**

l'énergie que l'on produit sur la planète est gaspillée sous la forme de chaleur perdue ou chaleur fatale. L'ADEME estime qu'il existe pour l'industrie française un gisement valorisable de chaleur fatale de plus de 53 terawattheures/an (un équivalent électrique de 1700 éoliennes de 5 mégawatt-crête !). **Il y a donc un enjeu écologique et une marge de manœuvre considérable à l'exploiter pour améliorer l'efficacité énergétique** des applications industrielles et c'est le cœur de notre activité.

HEVATECH s'est créée autour de la valorisation des rejets thermiques industriels, en proposant un procédé innovant de conversion de chaleur fatale en électricité, elle-même autoconsommée sur le site industriel, et en chaleur basse et moyenne température utilisable pour du chauffage ou dans le procédé client. Nous proposons ainsi aux clients une économie sur leur facture énergétique et une réduction de leur empreinte carbone, puisqu'ils consomment moins d'énergies électrique et fossile. L'axe de décarbonation que nous adressons permet de mettre en œuvre des solutions assez rapidement, avec un impact immédiat par rapport aux enjeux de préservation de la planète.

Suite à la reprise des actifs de la société H2P System, nous disposons de deux gammes de produit : une première solution pour des turbines fonctionnant entre 300 et 600 degrés et une seconde avec des moteurs à air chaud pour aller de 600 à plus de 1000 degrés.

HEVATECH s'adresse particulièrement aux industries les plus émissives : celles qui utilisent des fours (incinération de déchets, industrie du verre, sidérurgie, cimentiers, fondeurs....).

Quels sont les grands enjeux liés à votre marché ?

Les industriels ont déjà fourni des efforts considérables en matière de décarbonation. Ils ont fait face à une forte volatilité des prix



de l'énergie dernièrement et cela a contribué à accélérer la mise en place de solutions comme la nôtre, au-delà des volontés de décarbonation. La filière se développe, y compris à l'international et il existe des solutions concurrentes mais les gisements sont tels que nous échangeons régulièrement entre nous et travaillons en mode collaboratif au travers de l'association France Cleantech Industries et du Comité Stratégique de Filière. Notre particularité est de proposer des solutions qui peuvent être rapidement intégrées.

Les difficultés rencontrées à ce jour sont surtout liées au ralentissement et à la stagnation des investissements industriels en raison d'une conjoncture internationale compliquée sur le plan de l'accès à l'énergie. Le soutien de l'Etat sur la stratégie nationale de décarbonation de l'industrie permet de faire prendre conscience des enjeux associés à la récupération de cette chaleur fatale et de soutenir toute la chaîne de valeur qui se met en place depuis 5 ans sur le sujet de cette valorisation.

Quel est votre lien avec la recherche académique, y a-t-il encore des verrous technologiques à lever ?

HEVATECH compte parmi ses cofondateurs un chercheur qui a souhaité transférer ses connaissances dans un projet de startup et nous continuons à travailler de manière proche avec le monde académique : on peut citer dès l'origine le SIMAP et le CNRS de Grenoble, l'ENSAM de Paris, l'Ecole des Mines, ou encore le LEMTA de l'Université de Lorraine (avec une thèse et un post-doc). Tout le développement de notre technologie TURBOSOL s'est appuyé sur des interactions fortes avec ces partenaires. Plus récemment, nous avons collaboré avec l'ECAM Lyon, l'ESISAR Valence et nous proposerons prochainement un projet en collaboration avec le CEA-LITEN.

Aujourd'hui, plus que de verrou technologique, je parlerai davantage de recherche d'optimisation de nos systèmes, leur donner plus de puissance avec surtout l'objectif de réduire les coûts de fonctionnement de nos équipements. **Ces gains en performance amènent souvent des sujets en**

lien avec de la physique complexe, et le recours à la contribution académique nous est essentiel.

Nous avons également le souhait d'intégrer de nouvelles solutions type IoT (Internet of Things), par exemple sur le sujet de la communication des capteurs sans fil avec des systèmes à distance et nous faisons donc appel aux laboratoires qui nous amènent ces compétences particulières.

Qu'est-ce qui, selon vous, permettrait d'amplifier le mouvement de la création de startups auprès des chercheurs ?

Il faut continuer de décloisonner le monde académique et le monde socio-économique, réussir à mixer les équipes au plus tôt afin d'associer la vision économique et industrielle dès le départ de la maturation d'une technologie : ce travail en co-construction me semble essentiel.

En France, nous avons la chance d'avoir un système d'accompagnement public de la recherche et de l'innovation qui est particulièrement conséquent, notamment sur cet axe de la décarbonation : depuis les dispositifs de soutien des projets de recherche et ce programme CACTUS jusqu'aux soutiens ADEME, Bpifrance et autres dispositifs régionaux pour les entreprises. Le challenge reste de rendre ce chemin le plus lisible et le plus simple possible pour les entrepreneurs. Enfin, l'accès au capital-risque sur le territoire reste aujourd'hui difficile car les retours sur investissement sur des innovations industrielles sont sur des temps particulièrement longs : cela reste un frein à lever qui pourrait aider au développement de nouvelles startups, frein qui n'existe pas dans des pays comme les Etats-Unis par exemple.



KEY OPINION LEADER INDUSTRIEL



Julien POILLOT

Directeur des projets innovants du Groupe
VICAT

Pouvez-vous nous présenter VICAT en quelques mots et son implication sur la thématique de la décarbonation de l'industrie ?

La société VICAT est une entreprise familiale française de plus de 200 ans d'histoire depuis l'invention du ciment artificiel par Louis VICAT. Le groupe est aujourd'hui présent dans 12 pays, avec 4 milliards de chiffre d'affaires et emploie 10 000 personnes environ. Nous restons fortement implantés en France puisque nous y réalisons 1/3 de notre activité. La production de ciment, cœur de notre savoir-faire historique, nous a amené à développer d'autres expertises connexes comme la production de granulats, de béton et les contrôles ou transports associés.

Le ciment représente 6 à 7% des émissions des CO₂ à travers le monde, plus de la moitié étant produit par la Chine. Une tonne de ciment émet à ce jour environ 600 kg de CO₂ et les volumes de production restent conséquents (4 milliards de tonnes/an). Comme nous n'avons que peu

d'alternatives de matériaux de construction disponibles en grande quantité à l'échelle mondiale et à bas coût (10 à 15 cts/kg), ceci implique un effort particulier et nécessaire pour décarboner le produit existant.

Chez VICAT, nous avons une stratégie de décarbonation globalement alignée avec le plan de transition sectoriel de l'ADEME. **Nous travaillons plusieurs axes : le premier, porte sur la substitution des combustibles fossiles**, cet axe est mis en œuvre depuis plus de 40 ans via la valorisation de différents déchets, nous avons créé une filière dédiée qui gère cet approvisionnement, et nous avons déjà plusieurs usines qui ont réussi à éradiquer les combustibles fossiles.

Le second porte sur la baisse du taux de clinker incorporé dans le ciment par substitution partielle avec d'autres matières. Nous avons, par exemple, développé des nouveaux procédés qui permettent de travailler sur une base d'activation des argiles. Le 3ème axe repose sur la capture et la valorisation ou stockage de CO₂ résiduel émis (CCUS : Carbon Capture, Usage and Storage).

Enfin au-delà de la production même de ciment, nous travaillons sur toute la chaîne de valeur en aval : développement de nouveaux bétons qui permettent de réduire la consommation de ciment sur la conception des structures de bâtiments, réduction de l'impact carbone lié au transport des matériaux, la valorisation des matériaux de récupération etc...

Quels sont les enjeux de votre filière et les verrous technologiques résiduels ?

L'ensemble de la filière se voit concernée par les axes présentés précédemment : chaque continent a ensuite ses propres contraintes réglementaires ou historiques. Le point clef de la décarbonation pour notre secteur reste



de réduire le taux de clinker incorporé : cet élément constitutif du ciment est en effet responsable des émissions de GES du ciment, car il met en œuvre la décarbonation du calcaire pour produire de la chaux et le procédé libère du CO₂. Le travail sur la substitution du clinker amorcé depuis plusieurs dizaines d'années reste à amplifier.

En ce qui concerne les solutions de CCUS, les difficultés de mise en œuvre sont davantage liées à la difficulté de monter des chaînes logistiques pionnières complètes et aux coûts associés qui restent très importants : les coûts d'installation des systèmes de capture du CO₂ peuvent aller jusqu'à 2 fois le prix de l'investissement d'une cimenterie ! La chaîne de valeur complète au niveau du CCUS est donc encore à construire.

Un autre enjeu primordial est de développer des procédés qui consomment moins d'énergie (y compris pour la valorisation du CO₂ capté) et si possible de l'énergie non fossile. **L'électrification des procédés sur des systèmes très haute température reste aujourd'hui un défi**, avec la question clef de la gestion de l'intermittence des énergies renouvelables dans un procédé de production qui doit pouvoir tourner en continu.

Pouvez-vous nous préciser les liens entre VICAT et les laboratoires de recherche publics ? Quelle est votre stratégie de partenariat pour développer les innovations ?

Nos services internes R&D travaillent sur les nouveaux produits, à savoir les nouveaux ciments et bétons, mais aussi de nouvelles méthodes de mise en œuvre comme l'impression 3D. De mon côté, je suis en charge des projets innovants en vue de la décarbonation de notre industrie sur des sujets plus opérationnels de mise en œuvre, et nous ne menons pas de R&D en propre sur ces sujets. Malgré tout, cela nous arrive de contribuer en direct à certains projets comme par exemple pour développer une nouvelle technologie de production de clinker en oxycombustion totale 2ème génération, en partenariat avec 3 autres cimentiers sur le projet Ci4C.

Nous sommes à l'écoute des résultats des laboratoires de recherche, notamment sur des phases de prématuration/maturation, ou encore de certaines startups pour tester des nouvelles solutions et leur offrir des cas d'usage. Nous pouvons également participer financièrement au développement de ces startups et prendre des participations : cela a été le cas avec la startup GENVIA par exemple, qui travaille sur la production d'hydrogène décarboné par électrolyse haute température d'oxyde solide à l'échelle industrielle.

De votre point de vue d'industriel, comment percevez-vous le nouveau dispositif CACTUS qui finance des projets de prématuration et maturation technologique ?

Aujourd'hui, nous sommes très concentrés sur la mise en œuvre de technologies matures pour pouvoir répondre aux objectifs de 2030. **Les projets qui sont en prématuration/maturation sont cependant d'intérêt car ils amèneront des nouvelles solutions à horizon 2040.** C'est donc important que l'Etat soutienne ces phases et nous restons intéressés par la démarche et ses résultats.

Nous avons d'ailleurs intégré le comité industriel du PEPR SPLEEN avec l'objectif de porter un regard d'industriel sur la mise en perspective des résultats académiques : il reste essentiel de bien anticiper le passage à l'échelle et la disponibilité des ressources associées, ou encore d'anticiper l'acceptabilité de nouvelles solutions de production.

COMMENT CANDIDATER AU DISPOSITIF CACTUS ?

Comment savoir si mon projet est éligible ?

Vous êtes chercheur, enseignant-chercheur, ingénieur d'un laboratoire, d'un établissement ou organisme membre de l'un des établissements partenaires.

Votre projet peut donner lieu à un transfert de technologie vers un industriel ou à la création de startup issue de vos travaux de recherche (TRL 2 à 6) sur l'un des axes suivants :

- **Efficacité énergétique** : solutions de récupération de la chaleur fatale, développement de technologies à haut rendement énergétique, développement de systèmes de mesure et analyse visant à l'optimisation des performances d'outils de production, conception d'équipement moins énergivores, intégration du jumeau numérique.
- **Décarbonation des procédés (notamment pour la chimie et la sidérurgie)** : électrolyse haut rendement, électrosynthèse, recyclage chimique, efficacité matière, intensification des procédés, changement du mix énergétique (combustible alternatifs, biomasse, intensification de l'utilisation de l'hydrogène décarboné).
- **Électrification des procédés** : Electrification de

la production de chaleur avec l'installation de fours électriques, électrification des turbines et chaudières des vapocraqueurs, importantes consommatrices d'électricité. Cet axe doit faire appel à de l'électricité décarbonée, c'est-à-dire de l'électricité issue des énergies renouvelables (éolien, solaire et hydraulique) ou du nucléaire.

- **Capture, transport, stockage et valorisation de CO₂** : La mise en œuvre de technologie de captage du CO₂ performant et économe. Le développement de solutions de valorisation du CO₂ innovantes.

Quelles sont les conditions pour candidater ?

N'hésitez pas à en discuter avec votre directeur de laboratoire et votre service de valorisation.

Votre projet devra avoir bénéficié d'un accompagnement en prématuration ou maturation par votre établissement ou par votre SATT.

Comment soumettre mon projet ?

Les dossiers sont déposés au fil de l'eau et sont ensuite analysés par le comité d'engagement et de sélection (CES) du consortium CACTUS qui se réunit régulièrement.

Pour toute question, n'hésitez pas à solliciter la cellule opérationnelle de CACTUS.

Pour la prématuration, TRL 2-3 : contact.premat-mat@cnsrinnovation.fr

Pour la maturation, TRL 4-6 : cactus@pulsalys.fr



LES PARTENAIRES DU CONSORTIUM CACTUS

Chef de file prématuration :



Chef de file maturation :



Contrat ANR

Ce financement bénéficie d'une aide de l'État générée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 :

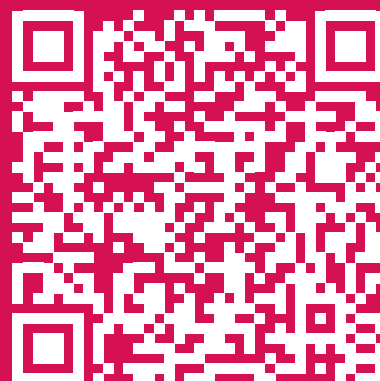
- Prématuration : ANR-21-MATP-0601
- Maturation : ANR-21-MATP-0602



CACTUS

DÉCARBONATION DE L'INDUSTRIE

UNE QUESTION,
UNE DEMANDE,
UNE INFORMATION,
UN RENDEZ-VOUS...



Contactez : cactus@pulsalys.fr



**ACCÉDEZ EN AVANT-PREMIERE
AUX INNOVATIONS DE RUPTURE**
issues de la recherche publique

Suivez l'actualité du Réseau SATT
www.satt.fr

