

***Quel besoin de soutien au développement de
technologies de rupture
pour la décarbonation de l'industrie chimique ?***

***Contribution à l'élaboration
de la stratégie d'accélération de la décarbonation
de l'industrie***



Alliance Nationale de coordination de la Recherche pour l'Énergie

Quel besoin de soutien au développement de technologies de rupture pour la décarbonation de l'industrie chimique ?

Contribution à l'élaboration de la stratégie d'accélération de la décarbonation de l'industrie

Les émissions de gaz à effet de serre du secteur industriel de la chimie, qui représentent 26 % des émissions de l'industrie manufacturière française, ont diminué de 61 % depuis 1990. Néanmoins l'atteinte des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050 reste un enjeu fort pour les entreprises de ce secteur. Si le recours accru aux énergies renouvelables et aux intrants « verts » sont des voies déjà en développement, des ruptures technologiques sont aussi attendues pour les procédés de conversion et les équipements.

Aujourd'hui, de nombreux laboratoires de recherche académiques sont impliqués dans de tels travaux, parfois en partenariat. Toutefois, leur caractère très amont et leur niveau de maturité technologique encore bas (*Technology Readiness Level* souvent inférieur à 3), conduisent à ce que ces travaux soient encore peu connus et que le chemin soit long et risqué pour les faire aboutir à une application grande échelle en milieu industriel.

Soutenir les projets les plus impactants et accélérer leur passage du laboratoire de recherche à l'industrie sont donc des enjeux pour atteindre la neutralité carbone pour l'industrie française. C'est l'objectif de la stratégie d'accélération de la décarbonation de l'industrie en cours d'élaboration.

En se focalisant sur l'industrie chimique, ce document vise donc à répertorier les grands axes de Recherche et d'Innovation à soutenir dans ce cadre. Il s'appuie sur les éléments partagés lors du webinaire ADEME ANCRE ANR « Innovations de rupture pour la décarbonation de l'industrie chimique » qui s'est tenu le 9 mars 2021.

Pour réduire l'empreinte environnementale des procédés de conversion, les pistes à suivre sont l'intensification de ces procédés, la recherche de procédés innovants plus économes en matière et en énergie (Axe 1), l'amélioration des étapes élémentaires (distillation, séparation, échange thermique... Axe 2) ou encore l'utilisation de nouveaux intrants matière et énergie à moindre empreinte environnementale (Axe 3).

Axe 1 : les procédés de conversion

Ces procédés visent à produire des molécules pour la chimie (molécules plateformes), la chimie fine (cosmétique et pharmacie), des molécules bio-sourcées, des polymères mais aussi d'autres produits de la chimie minérale comme des ciments bas carbone.

Les procédés de transformation « classiques » par catalyse peuvent voir leur besoins énergétiques réduits par des travaux toujours nécessaires sur les catalyseurs et l'ingénierie catalytique (support, accès aux sites, sélectivité des réactions catalytiques), travaux qu'il faut continuer à soutenir.

En parallèle, le soutien, dans la durée, des développements de nouveaux modes de transformation en rupture est certainement source de grands progrès. Ainsi les procédés d'activation photocatalytiques, sonochimiques (ultrasons), mécanochimiques et de photo-oxygénation sensibilisée ou encore les procédés biotechnologiques, en développement dans les laboratoires de recherche académiques français doivent être accompagnés pour passer de leur degré d'avancement actuel (TRL de 2 à 5) à un stade industriel et à un déploiement large.

Pour cela, il convient de soutenir les travaux visant à l'optimisation des réacteurs ou à la conception de réacteurs hybrides (multi-technologies) ce qui passe par leur design, via la modélisation et la simulation, ce qui permettra aussi d'identifier les paramètres clés pour leur intensification. Le passage des procédés *batches* aux procédés continus est aussi un moyen d'intensification. D'autres actions à soutenir doivent viser à améliorer les technologies d'éclairage pour les procédés photochimiques et à développer des catalyseurs basés sur des atomes abondants.

Par ailleurs, la généralisation d'outils de modélisation des procédés, des systèmes et de leur enchaînement (optimisation de « superstructures » de procédés) mais aussi celle des outils de pilotage en temps réel est un axe de développement fort, applicable aussi bien aux projets nouveaux qu'à la rénovation d'installations anciennes. Ces outils doivent s'appuyer sur des données réelles. Aussi les développements de capteurs et de systèmes d'analyses en ligne, qui permettent l'acquisition de ces données fondamentales, sont à encourager.

Axe 2 : les étapes élémentaires

Si l'on ne peut pas tous les jours inventer un nouveau procédé de conversion chimique en rupture, les innovations sont aussi attendues sur les briques élémentaires de ces procédés. Ces innovations doivent permettre une optimisation énergétique en améliorant le rendement et les performances de la transformation de la matière. Il faut pour cela agir sur le design, les conditions d'utilisation et le contrôle du système. Dans la plupart des cas, cela revient à intensifier les transferts thermiques et des espèces ou à augmenter le taux de conversion par unité volumique, pour optimiser ou accélérer la réaction chimique. Plusieurs équipements innovants de ce type sont actuellement en développement dans les laboratoires académiques.

Un des principaux enjeux est ainsi l'amélioration des réacteurs chimiques et notamment des éléments internes (contacteurs gaz liquide, contacteurs à bulles, film tombant...) pour maximiser les transferts thermiques, massiques et réactifs. Dans ce cadre, le développement d'outil de modélisation et de simulation est bien sûr à soutenir, de même que celui de nouvelles méthodes comme l'optimisation topologique et l'utilisation d'impression 3D. En ce qui concerne les réacteurs, une autre voie est le développement et l'utilisation de réacteurs micro- et milli fluidiques. Ceux-ci, appliqués à des procédés de chimie organique, de photochimie ou d'électrosynthèse montrent en laboratoire un apport conséquent sur les transferts thermiques et massiques, sur la vitesse d'absorption des photons ou sur les rendements faradiques.

Par ailleurs, les propriétés de surface des matériaux utilisés dans les réacteurs et les échangeurs, telles que la rugosité, la mouillabilité mais aussi la fonctionnalisation de ces surfaces par une chimie moléculaire éventuellement couplée à une texturation, apparaissent pouvoir jouer un rôle important pour améliorer la qualité et le rendement du procédé en jeu. Ces travaux sont là aussi à soutenir.

Parmi les procédés de séparation, la distillation tient une place importante dans de nombreux procédés de conversion chimique. Un des verrous concernant celle-ci est la séparation de composants dont les volatilités sont proches, ce qui souvent nécessite une grande quantité d'énergie. Le développement de technologies permettant de réduire cette demande, comme le concept de colonne HiDiC (Heat Integrated Distillation Column) et les réacteurs multifonctionnels couplant réaction et séparation est donc à soutenir.

Autre technologie de séparation : les membranes qui font l'objet de nombreux travaux et développements. Leurs principaux atouts sont la simplification des procédés, l'évitement de solvants impactant l'environnement, la possibilité d'adapter la pureté recherchée au besoin et surtout la diminution de la consommation énergétique par rapport aux procédés thermiques. Si la demande d'énergie des procédés de séparation membranaires est moindre, il faut noter que l'énergie utilisée est de l'électricité et non pas de la chaleur ce qui contribue donc à l'électrification des procédés et

donc, quand cette électricité est bas carbone, voire décarbonée à la réduction significative de l'empreinte environnementale. Les avancées récentes sur les membranes montrent leur adaptabilité, utilisées en synergie avec d'autres technologies comme les nano-catalyseurs, le CO₂ supercritique, ou bien mises en œuvre dans des cascades de séparateurs.

Si la plupart des procédés de séparation membranaire sont maintenant matures, employés non seulement pour traiter les milieux aqueux, mais aussi les solvants organiques, cette technologie n'est pas encore largement répandue dans l'industrie chimique. Il est possible que le basculement vers un procédé membranaire représente pour un site industriel un changement trop radical ou encore que la fiabilité et le coût de ces technologies ne soient pas à des niveaux acceptables pour les investisseurs. Les actions visant à faciliter l'appropriation par les industriels des technologies de séparation membranaire sont donc à soutenir.

Enfin les travaux plus fondamentaux sont aussi à encourager, car source de futures ruptures, que ce soit sur la compréhension ou la modélisation des phénomènes mis en jeu ou la recherche d'application à des phénomènes non encore mis en jeu dans les procédés ou briques élémentaires de conversion chimique.

Axe 3 : Utilisation de nouveaux intrants matière et énergie à moindre empreinte environnementale

La biomasse, l'énergie solaire thermique ou encore le CO₂ sont des intrants soit énergie soit matière qui peuvent permettre de réduire l'empreinte environnementale des procédés chimiques.

Ainsi en « biosourçant » les procédés de conversion chimique il est possible de moins recourir à des produits fossiles tout en produisant soit les mêmes molécules, soit des molécules nouvelles aux propriétés innovantes et potentiellement différenciantes.

Aujourd'hui, le secteur de la chimie utilise 10% de ressources issues de la biomasse pour ses approvisionnements mais cette proportion peut être accrue en aidant au déploiement de bioraffineries ou encore de culture micro-algale. Toutefois la biomasse végétale est une ressource très sollicitée et la concurrence de la chimie du végétal avec les autres usages de la biomasse (énergie par exemple) peut être un frein à son développement. L'utilisation de déchets peut permettre de contourner cette limite. En effet, la valorisation et/ou le recyclage des déchets et des chutes de productions ainsi que des sous-produits dans une logique d'économie circulaire peut conduire à une amélioration du bilan environnemental des industries chimiques. Une autre approche d'intérêt est la recherche de réactifs moins « carbonés », comme l'hydrogène vert par exemple, mais pas uniquement. Cependant, le passage d'une chimie basée sur des intrants « fossiles » à une chimie biosourcée ou utilisant des déchets comme intrants peut être limité si l'outil industriel existant est pour tout ou partie à revoir, ce qui représente à la fois un coût et un changement de pratique. Toutes les actions qui peuvent faciliter ce passage sont donc à encourager.

L'introduction de chaleur solaire haute température (i.e. > 400°C) est aussi à soutenir, car elle peut permettre de fournir de la chaleur pour la production de vapeur mais aussi de l'énergie aux réactions endothermiques comme le réformage, la gazéification... Le développement de récepteurs / réacteurs solaires et les actions permettant de réduire les coûts, le besoin de surface et l'impact de l'intermittence sont des axes de R&I qui contribueront au développement de cette filière. Par ailleurs, pour valider une telle approche, il conviendrait de favoriser la mise en adéquation d'un procédé industriel intensif en énergie et à fort impact environnemental avec ce type de solution.

Enfin, parmi tous les « déchets » utilisables comme intrant pour les procédés de conversion chimique, il en est un qui est aussi d'intérêt : le CO₂. De nombreux travaux sont en cours actuellement dans les laboratoires de recherche pour développer des procédés de conversion chimique, électro-catalytique ou photo-catalytique ainsi que sur l'amélioration des procédés de capture et de séparation, souvent nécessaires en amont. Par apport d'énergie (électricité décarbonée) ou de réactif (H₂), il est possible de produire nombre de molécules d'intérêt : CO, CH₄,

méthanol... Ces procédés offrent de plus des perspectives d'unités de production décentralisées et de stockage d'électricité excédentaire. Cependant, la grande majorité de ces développements est à un TRL faible (<4). Avant l'accompagnement de ces travaux pour les aider à passer à l'échelle industrielle, il convient de soutenir les actions visant à l'amélioration de leur efficacité et de leur extrapolation et à leur moindre recours à des catalyseurs utilisant des métaux nobles.

Du point de vue général

Plusieurs solutions évoquées ici sont pour le moment réservées à des productions de niche. Il faut investiguer leur potentiel sur des productions ayant le plus fort impact environnemental et trouver des débouchés pour sortir de ces marchés limités.

Par ailleurs, pour aider ces développements à passer ce que l'on qualifie habituellement de « *vallée de la mort* » (passage du TRL 3 à 7) et ensuite atteindre le stade industriel, il faut aussi faciliter les partenariats industrie – recherche en cherchant, lorsque cela est possible à diversifier les applications possibles des technologies développées ou à mieux les cibler. De même, tout ce qui peut concourir à faciliter le passage à l'échelle et la réduction des coûts doit être soutenu (Pilote → Démonstrateur → 1^{ère} industrielle).

Enfin, le potentiel de décarbonation des solutions envisagées doit être évalué à tous les stades des développements et être mis en rapport avec les efforts et les dépenses de R&I.