

La recherche partenariale public-privé, un moteur d'innovation en chimie biosourcée

Résumé Le besoin de « défossiliser » rapidement notre société nécessite de revisiter les réactions et plus généralement les procédés dans l'industrie chimique. En particulier, l'électrification de notre société nous conduit à repenser les modes d'activation des molécules mais modifie également fondamentalement l'utilisation (efficace) de l'énergie dans les réactions chimiques. La jeune génération de chercheurs sera très certainement le témoin d'un changement profond de nos modes de production en chimie, ouvrant ainsi de nouveaux champs d'exploration et des opportunités uniques pour créer de l'innovation. Au travers de l'exemple de la chimie biosourcée, cet article montre le rôle central de la relation public-privé non seulement pour l'émergence de technologies ou produits en rupture, mais également pour augmenter l'impact des recherches d'un laboratoire académique. L'une des clés consiste à aligner, le plus en amont possible des projets, des grandes questions scientifiques avec des grandes problématiques industrielles ou sociétales.

Mots-clés Chimie biosourcée, recherche partenariale, innovation, réseau.

Abstract Public-private research partnerships, a driver of innovation in biobased chemistry

The need to rapidly "defossilize" our society requires scientists to revisit reactions, and more generally processes, in the chemical industry. In particular, the electrification of our society is not only leading us to rethink how molecules can be more efficiently activated but is also fundamentally changing the (efficient) use of energy in chemical reactions. The younger generation of researchers will undoubtedly witness a profound change in the way we produce chemicals, opening up new fields of exploration and unique opportunities for innovation. Using the example of biobased chemistry, this article demonstrates the central role of the public-private partnership, not only for the emergence of breakthrough technologies or products, but also for increasing the impact of academic laboratory research. One of the keys is to align, as far upstream as possible, major scientific questions with major industrial or societal issues.

Keywords Biobased chemistry, public-private partnership, innovation, network.

La recherche partenariale au cœur de l'innovation

Réaliser une recherche en rupture n'est pas à elle seule un gage de réussite en termes d'innovation. Il est nécessaire de bien appréhender quelles sont les cibles les plus prometteuses (réactions, procédés, produits, services, etc.) et surtout le cahier des charges qui est associé à une transformation chimique, par exemple en termes de productivité, de coût, de sélectivité. Dans ce contexte, un rapprochement fort entre laboratoires académiques et industriels est l'une des clés du succès. Cette collaboration repose avant tout sur l'expertise scientifique des chercheurs. Si la collaboration public-privé peut prendre plusieurs formes contractuelles (projet bilatéral, labcom, PIA, etc.), dans tous les cas le succès repose sur la confiance mutuelle qui s'installe entre le laboratoire public et l'industriel, et cela se construit dans le temps. Au cours des dernières années, voire quelques décennies, la recherche académique a évolué : en effet dans la plupart des modèles actuels ciblés, les laboratoires développent leur expertise, leur découverte, puis contactent des industriels pour tenter de valoriser leurs travaux. Si cette approche a conduit à quelques succès, le nombre d'échecs est toutefois très important car le principal risque est d'être trop éloigné des cibles ou des spécifications du domaine. Par exemple, développer une expertise scientifique unique et reconnue et tenter de l'appliquer à un domaine particulier, alors que le besoin industriel/sociétal est sur un autre domaine, nécessite de repenser complètement la recherche au moment du transfert, un retour en arrière regrettable alors que l'expertise et la rupture scientifique sont bien là. Pour notre part, et lorsqu'il s'agit d'une recherche

contractuelle, nous avons opté pour une autre stratégie, c'est-à-dire intégrer les industriels le plus en amont possible des travaux de recherche afin de créer, ensemble, une route commune. L'avantage est que le risque scientifique et donc la rupture sont placés directement sur des cibles ou des verrous technologiques auxquels font face les industriels, ce qui doit accélérer *in fine* le transfert vers l'industrie.

Chimie biosourcée et innovation

La défossilisation de l'industrie : un domaine en attente d'innovation

La surexploitation des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz), et les problèmes environnementaux qui y sont associés (changement climatique, érosion de la biodiversité, accès à l'eau potable, etc), nécessitent de revoir le mode de développement de notre société et une impulsion forte est actuellement donnée à sa « défossilisation ». Différentes stratégies sont maintenant à l'étude, parmi lesquelles on peut mentionner le captage et la séquestration du CO₂, l'électrification, le recyclage, la recherche de nouvelles technologies toujours plus économes en énergie, en eau, en ressources, etc., ou encore l'utilisation du carbone renouvelable (biomasse, CO₂, etc.). Parmi ces différentes options, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la biomasse, une thématique sur laquelle le site universitaire de Poitiers avait déjà acquis une certaine expertise, offrant ainsi un environnement propice pour réaliser des recherches en rupture dans ce domaine, environnement qui inclut un fort réseau industriel.

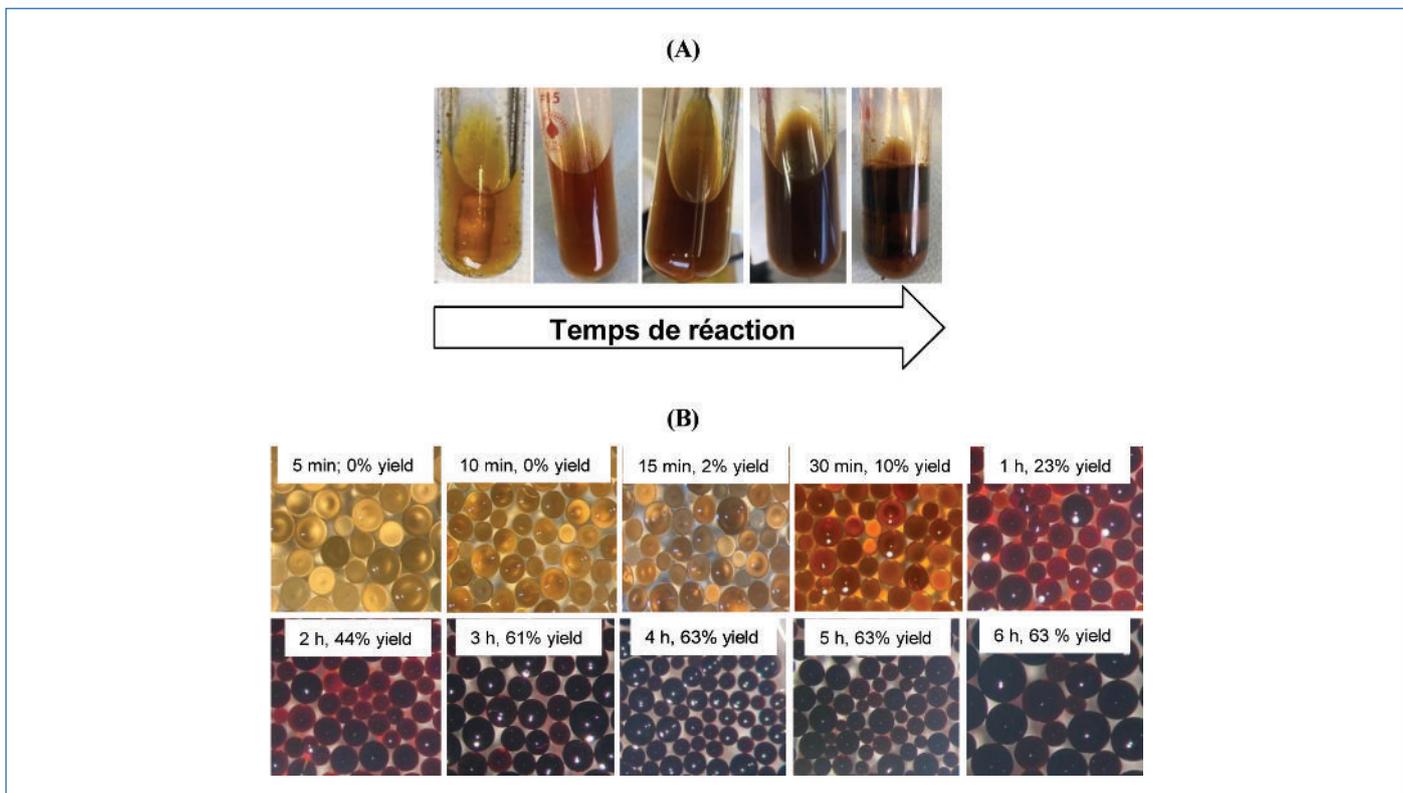


Figure 1 - (A) Formation et précipitation parasite des humines au cours de la conversion catalytique du fructose en acide lévulinique ; (B) dépôt des humines sur la surface du catalyseur (= désactivation) au cours de la réaction.

Identifier l'enjeu scientifique

La biomasse, et plus particulièrement la biomasse lignocellulosique, représente un immense gisement de carbone renouvelable. Cette biomasse est constituée à 60-75 % de sucres à partir desquels il est « théoriquement » possible de fabriquer une multitude de composés chimiques. Cependant, si la littérature dans le domaine est foisonnante, force est de constater que le nombre d'exemples atteignant le stade industriel reste très limité (par exemple furfural, éthanol, xylitol) [1]. Sur le plan scientifique, l'un des obstacles provient des réactions parasites de dégradation des sucres conduisant à la formation de goudrons, aussi appelés humines. En plus de diminuer la sélectivité des réactions, ces humines se déposent sur les catalyseurs, conduisant à leur rapide désactivation (figure 1). Afin de limiter cette polycondensation des sucres, la très grande majorité des travaux consiste actuellement à convertir des solutions diluées de sucre (< 5 % en poids). Si cette approche permet effectivement d'augmenter la sélectivité des réactions et d'allonger la durée de vie des catalyseurs, elle conduit en retour à des productivités de réacteurs qui sont très loin des attentes actuelles de la chimie fine, ainsi qu'à des processus de purification et d'isolement des produits très énergivores [2-3]. Développer de nouvelles technologies capables de convertir, sélectivement, des solutions concentrées de sucre en produits chimiques d'intérêt, est l'un des grands défis de la chimie biosourcée sur lequel nous mettons nos efforts en termes de recherche depuis plusieurs années.

Quelles sont les cibles potentielles ?

Contrairement au carbone fossile qui est majoritairement composé d'hydrogène et de carbone, la biomasse est beaucoup plus riche en oxygène. Dans ce domaine, notre stratégie n'est en aucun cas de rentrer en compétition avec la filière éprouvée du carbone fossile, mais plutôt de tirer profit

de la fonctionnalité chimique, parfois complexe, présente dans la biomasse, afin d'amener de nouvelles propriétés et d'atteindre des performances qu'il est difficile d'obtenir à partir du carbone fossile. Les polysaccharides représentent un exemple assez illustratif. Il s'agit de polymères naturels de sucre, qui possèdent des propriétés physicochimiques uniques avec très souvent de nouvelles performances par rapport aux polymères pétrosourcés, y compris en termes de biodégradabilité. C'est pour cette raison que les polysaccharides envahissent aujourd'hui de plus en plus le marché dans différents domaines tels que les matériaux, la cosmétique, l'agriculture, l'alimentaire, etc. Économiquement parlant, il fait sens en général de garder au maximum l'oxygène contenu dans la biomasse. La figure 2 illustre clairement que la valeur

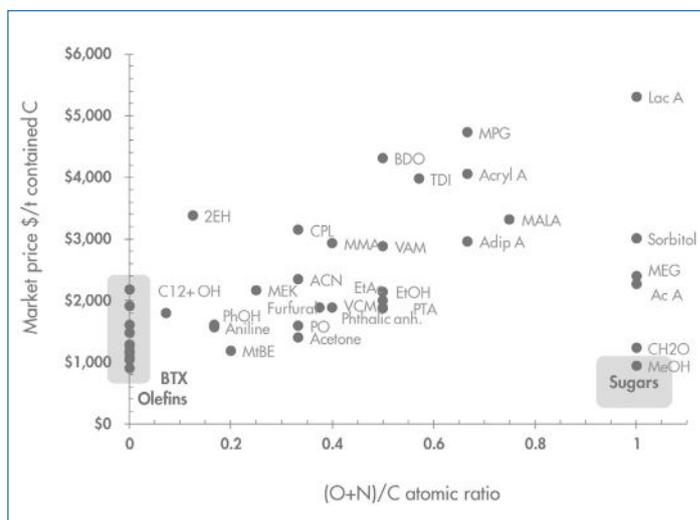


Figure 2 - Évolution du prix de marché des molécules biosourcées en fonction de leur teneur en oxygène et azote contenus dans la biomasse. (D'après [4]).

ajoutée des molécules biosourcées augmente avec leur teneur en oxygène (moins d'étapes de transformation), les rendant potentiellement plus compétitives sur le marché par rapport à leurs homologues pétrosourcés [4]. C'est aussi pour cette raison que le taux de substitution des molécules pétrosourcées par des molécules biosourcées est plus fort dans des domaines de plus haute valeur ajoutée comme la cosmétique, la détergence ou encore les peintures, des marchés qui sont également proches du consommateur, ce dernier étant très demandeur en composés renouvelables.

Il est important de souligner ici que, quelles que soient les cibles choisies, un produit biosourcé n'est en aucun cas un gage de durabilité, de biodégradabilité, de non-toxicité ; tout cela doit être démontré scientifiquement.

Quels critères intégrer en recherche pour faciliter son transfert ?

Intégrer le plus en amont possible des recherches les problématiques industrielles en termes de productivité de réacteur, de sélectivité, de coût, etc., est un paramètre qui nous paraît essentiel en termes d'innovation, car cela permet d'identifier les questions et verrous scientifiques sur lesquels une recherche exploratoire sera réalisée. J.-P. Lange a récemment décrit un ensemble de critères simples permettant de guider les chimistes vers une recherche plus compétitive, en termes de transfert vers l'industrie [2-4]. Ces critères permettent également de bien identifier les efforts prioritaires en matière de recherche dans une optique de transfert. À titre d'exemple, le coût de production d'une molécule biosourcée doit être à minima inférieur au coût de la matière première plus le coût de sa transformation, et donc satisfaire à l'équation suivante dans laquelle N représente le nombre d'étapes réactionnelles et 200 est une constante estimant, macroscopiquement, le coût d'une transformation chimique :
prix de mise sur le marché

$$< (\text{prix de la matière première} + 200 \times N)$$

En utilisant cette équation simple, on peut très rapidement estimer la viabilité économique d'une transformation chimique. Par exemple, à partir d'un glucose à 300 € la tonne, il est potentiellement attractif de synthétiser des produits oxygénés tels que de l'acide acrylique, de l'éthylène glycol, de l'acide acétique [4]. En revanche, produire des molécules de plus faible valeur ajoutée comme du benzène, de l'hydrogène ou de l'éthylène est, économiquement parlant, quasiment voué à l'échec [4]. Dans ce dernier cas, il sera alors nécessaire de faire évoluer la démarche scientifique, soit en développant de nouvelles technologies, moins énergivores et donc moins coûteuses, permettant de convertir le glucose en un minimum d'étapes, soit d'utiliser une autre source de biomasse moins onéreuse,

ces deux options soulevant bien évidemment des verrous scientifiques différents qu'il est important de considérer dès le début des recherches.

D'autres critères, plus liés à la réaction en elle-même, peuvent être également simplement utilisés pour accélérer le transfert vers l'industrie. Par exemple, il est généralement admis en industrie qu'1 g de catalyseur conduit à 1 kg de produit [2-3]. En considérant cette donnée purement appliquée, il devient rapidement possible de calculer le nombre de recyclages qu'il est nécessaire de réaliser avec un catalyseur, en réacteur batch, pour que ce dernier devienne intéressant d'un point de vue transfert industriel. Et nous encourageons tous les jeunes chercheur(se)s à prendre en compte ces critères : cinq à dix recyclages, comme souvent décrit dans les articles bibliographiques, ne permettent pas de répondre à cette question ! Pour les chercheurs souhaitant transférer leurs recherches, ce critère permet également de positionner des stratégies exploratoires au plus proche des enjeux scientifiques du domaine. Par exemple, afin d'augmenter la productivité des catalyseurs, est-il préférable d'explorer de nouvelles méthodes de conception de matériaux catalytiques ou d'étudier la mise en forme, la régénération des catalyseurs... ?

En chimie, la productivité des réacteurs est également un critère important à prendre en compte. Généralement, dans le domaine de la chimie fine, la productivité des réacteurs est supérieure à 60 kg/m³/h. À titre d'illustration, pour un réacteur de 10 m³ qui fonctionne pendant 8 000 h par an, cela représente une production d'environ 4 800 t/an. Dans le domaine de la chimie biosourcée, et notamment dans la transformation des sucres en phase aqueuse, ce critère est généralement ignoré, le rendement de la réaction étant très souvent le principal critère d'évaluation d'une transformation chimique. Pourtant, lorsqu'on utilise ce critère de productivité, on s'aperçoit très rapidement qu'en partant de solutions très diluées, on fait bien souvent plus de la « dépollution de l'eau » qu'une réelle transformation des sucres ! En effet, comme mentionné ci-dessus, la plupart des travaux dans le domaine de la conversion des sucres en produits chimiques de spécialité sont réalisés au départ de solutions de concentration généralement inférieure à 3-5 % en poids, et ceci afin d'éviter les réactions de polycondensation.

Comprendre comment augmenter la productivité des réacteurs (catalyseurs plus performants, milieux plus concentrés, etc.) sans compromettre la sélectivité de la réaction et la durée de vie des catalyseurs nécessite une réflexion scientifique fondamentale qui n'a pas encore été réellement abordée. Il existe bien évidemment d'autres critères à considérer tels que ceux présentés sur la figure 3 et mentionnés notamment dans le cadre du PEPR SPLEEN [5].

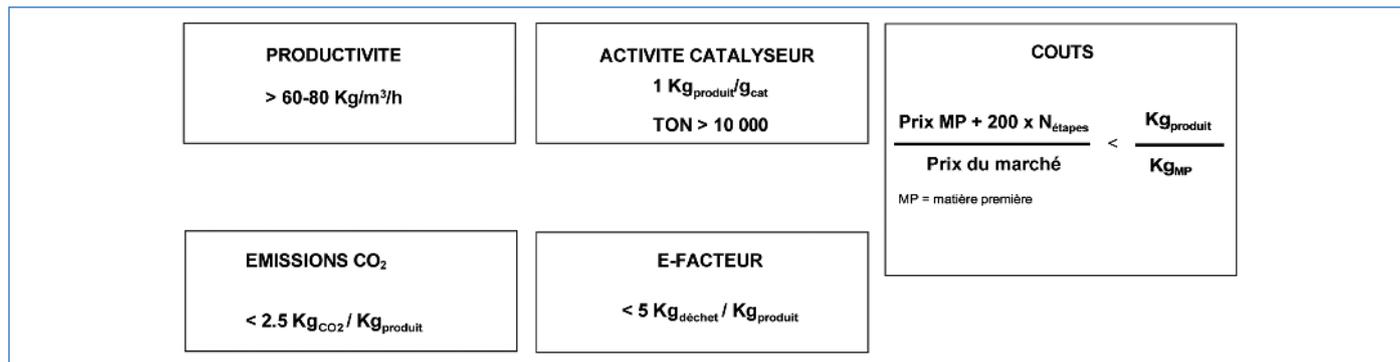


Figure 3 - Liste de quelques critères de succès pour le transfert d'une recherche académique vers l'industrie.

Ces critères, dont la liste n'est pas exhaustive, doivent être pris en compte par un chercheur souhaitant transférer ses travaux de recherche vers l'industrie, car ils permettent « d'aligner » des grandes questions scientifiques avec des problématiques industrielles ou sociétales prioritaires.

INCREASE : un « think tank » public-privé sur la chimie biosourcée

La relation public-privé est le socle de l'innovation. Dans ce cadre, nous avons créé en 2012 la Fédération de Recherche (FR) CNRS INCREASE. Cette fédération est avant tout un réseau collaboratif entre des laboratoires académiques possédant des expertises scientifiques complémentaires et des industriels de la chimie (Solvay, L'Oréal, Pennakem, ARD, FCBA). L'objectif commun est de réaliser une recherche de pointe tout en intégrant, comme discuté ci-dessus, les problématiques de transfert vers l'industrie dès la définition des projets de recherche. Les industriels ont pour objectifs de définir les molécules cibles et le cahier des charges sur lesquels les chercheurs mettront à profit leurs expertises scientifiques. Convaincue que la rupture scientifique, et donc l'innovation, émergeront à la frontière de plusieurs champs disciplinaires, la FR CNRS INCREASE a été pensée comme une boîte à outils avec des chercheurs issus de différents domaines tels que la catalyse, le génie des procédés, l'impact environnemental, l'analyse de cycle de vie, la physicochimie, les assemblages (supra)moléculaires, les polymères, les sciences humaines et sociales, etc.

La stratégie scientifique développée par la FR CNRS INCREASE consiste à explorer à la frontière de la chimie et de la physique pour proposer de nouveaux modes d'activation des produits chimiques biosourcés. En particulier, le consortium explore une activation « physique » plutôt qu'une activation chimique, comme c'est habituellement le cas. L'idée directrice est basée sur la génération d'espèces hautement réactives (radicaux, ions, espèces excitées, etc.), principalement par l'application d'un champ électrique (plasma atmosphérique non thermique), d'ondes ultrasonores ou de forces mécaniques sur un substrat. Les espèces formées *in situ* sont très réactives et induisent la conversion des substrats, souvent par des réactions en cascade et à des températures globalement proches de l'ambiante, ce qui est d'un intérêt considérable compte tenu de l'instabilité thermique par exemple des sucres. Toutefois, en contrepartie de la grande réactivité de ces espèces, le contrôle de la sélectivité des réactions est très complexe. Dans ce contexte, un couplage avec la catalyse hétérogène est étudié, une approche également connue sous le nom de catalyse assistée. Cette stratégie consiste à confiner la formation de ces espèces actives, ou événements « physiques », à la surface d'un catalyseur solide, afin d'assister le catalyseur dans l'étape déterminante d'un cycle catalytique et de contrôler plus facilement la sélectivité de la réaction. L'étude des mécanismes, principalement à l'aide de la théorie de la fonctionnelle de la densité (DFT), de réactions modèles et d'outils analytiques multiples, sont au cœur des recherches, non seulement pour comprendre et optimiser les conditions de réaction, mais aussi, dans certains cas, pour prédire la réactivité de certains produits chimiques biosourcés.

Si les recherches réalisées dans le cadre de la FR CNRS INCREASE ont montré que ce concept ouvrait la voie à des produits chimiques difficilement accessibles par les voies catalytiques conventionnelles, la consommation d'énergie de

ces technologies représente encore un obstacle scientifique qui doit être surmonté pour mettre en œuvre ces technologies à plus grande échelle. Deux stratégies sont actuellement explorées en collaboration : le passage de réacteurs batch (réacteurs fermés) à des réacteurs à flux continu, et à nouveau le couplage systématique avec la catalyse pour réduire les temps de réaction et également pour utiliser plus efficacement l'énergie (chauffage local par exemple).

Exemple de réalisation : quand le coût devient un problème scientifique

Projet initialement impulsé par la société ARD qui souhaitait développer une nouvelle voie d'accès à des tensioactifs biosourcés (alkylpolyglycosides), l'hydrolyse catalytique de la cellulose a été étudiée dans notre laboratoire, l'IC2MP, et ceci à partir de matières premières moins onéreuses (déchets de biomasse). Alors que la plupart des procédés d'hydrolyse de la cellulose implique l'eau comme solvant, le procédé développé a consisté à mettre en œuvre un broyage à sec (sans solvant) de la cellulose en présence d'un catalyseur acide [6] (figure 4). La clé du procédé repose sur un effet de synergie entre les effets mécaniques qui réduisent les interactions électroniques responsables de la « résistance » de la cellulose vis-à-vis de l'hydrolyse et l'action d'un catalyseur qui permet de protoner *in situ* les liaisons glycosidiques, conduisant ainsi à leur rupture. Ainsi, la cellulose broyée en présence d'acide sulfurique est sélectivement dépolymérisée en petits oligomères. Ces derniers, étant beaucoup plus réactifs que la cellulose, sont ensuite engagés avec succès dans des réactions de glycosylation conduisant à la formation d'alkylpolyglycosides (tensioactif utilisé en détergence), une famille de molécules cibles de la société ARD.

Un renforcement du projet avec la société Solvay, avec laquelle nous réalisons une recherche partenariale pérenne depuis de nombreuses années, a permis d'identifier des catalyseurs hétérogènes stables et recyclables au broyage, simplifiant ainsi considérablement les processus de purification par rapport à l'utilisation de l'acide sulfurique [7-8]. En parallèle, avec la société FCBA, la réactivité des hémicelluloses (deuxième polymère de sucre contenu dans la biomasse lignocellulosique) a été étudiée dans le procédé de broyage, ce qui a permis de transposer ce procédé en partant directement d'un déchet de biomasse non transformé, la paille, et d'accéder également à une nouvelle génération de tensioactifs [9]. Une analyse de cycle de vie réalisée par l'Institut des Sciences moléculaires de Bordeaux a montré que ce procédé permettait non seulement de diminuer globalement l'impact CO₂ d'un facteur 7 par rapport au procédé industriel actuel basé sur l'utilisation du glucose, mais également de réduire de 45 % la production d'effluents aqueux [10].

Sur la base de cette découverte, la start-up BioseDev, pilotée par deux anciens doctorants de l'IC2MP (Julien Souquet-Grumet et Florent Boissou), a été créée [11]. BioseDev développe aujourd'hui cette technologie de mécanocatalyse à l'échelle du kg, notamment pour l'extraction de sucres à partir de différents déchets de biomasse, essentiellement pour des applications dans le domaine de la cosmétique (voir article p. 29).

Dans l'eau, solvant souvent incontournable pour la transformation des sucres, d'autres approches très exploratoires sont également développées. Nous avons par exemple montré, en collaboration avec l'Institut de Chimie séparative de Marcoule, que des bulles de cavitation, formées par l'application d'une

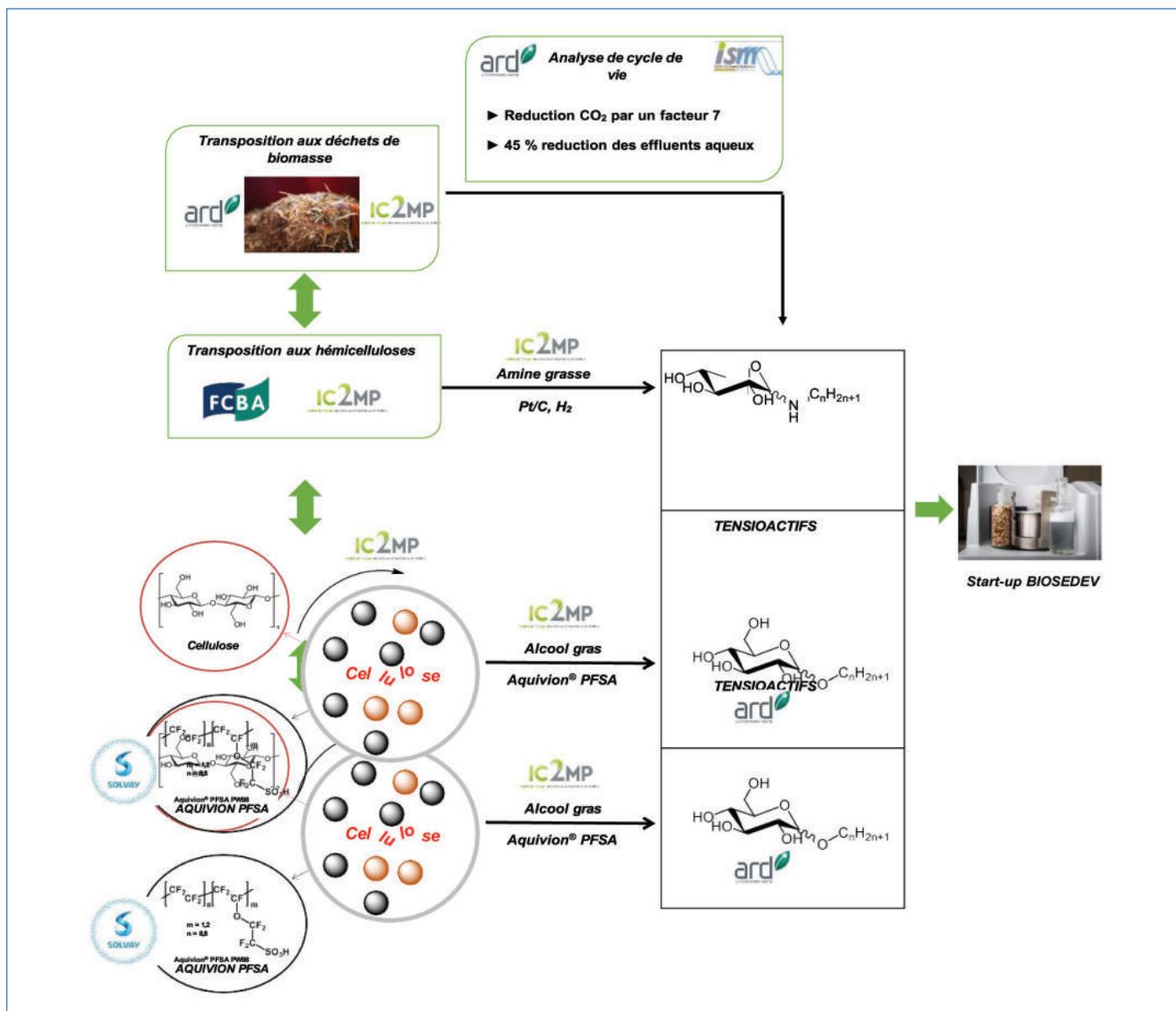


Figure 4 - Procédé de mécanocatalyse pour la synthèse de tensioactifs à partir de déchets de biomasse lignocellulosique : un exemple de projet collaboratif.

onde ultrasonore dans un liquide, peuvent se comporter comme des microréacteurs permettant l'activation de molécules gazeuses comme l'ammoniac ou la vapeur d'eau [12]. Même si nous sommes très clairement encore loin d'un transfert industriel, un des résultats marquants, obtenu en partenariat avec Solvay, est très certainement l'activation de NH_3 par les ultrasons haute fréquence permettant la réduction d'oléfines sans catalyseur et sans apport d'hydrogène, l'hydrogène provenant du « craquage » *in situ* de NH_3 [13]. En plus du dépôt de brevets, cette recherche partenariale avec différents industriels de la chimie a indéniablement permis aux chercheurs d'augmenter l'impact de leur recherche, que cela soit en termes de publications mais également dans la recherche de financements, dans l'ouverture vers le grand public et dans la formation. Par exemple, l'environnement de la FR CNRS INCREASE a servi de tremplin à Prince Amaniampong, chargé de recherche au CNRS, pour structurer son projet de recherche et obtenir une bourse ERC Starting Grant sur ces problématiques de couplage de la catalyse avec les ultrasons hautes fréquences (voir son article p. 21). Dans le montage de ce projet, les industriels ont indéniablement joué un rôle clé, notamment en nous guidant pour aligner le

potentiel de rupture du projet avec les grands enjeux de l'industrie chimique.

L'évènementiel et l'importance du réseau

Le réseau est bien évidemment une des clés de l'innovation : impossible d'innover seul dans son coin ! Pour cette raison, nous avons créé et organisons tous les deux-trois ans à La Rochelle l'« International symposium on green chemistry » (ISGC) [14]. Ce congrès CNRS rassemble environ 600-700 personnes issues d'une cinquantaine de pays différents. Pensé comme la FR CNRS INCREASE, l'objectif d'ISGC est de faire se rencontrer des académiques et des industriels et de créer une plateforme d'échange pour faciliter le montage de projets public-privé. Il est notamment demandé aux industriels et aux académiques de présenter respectivement leurs attentes en matière d'innovation et la progression de l'expertise scientifique à caractère fondamental. L'ISGC a d'ailleurs été l'élément déclencheur de la création de la FR CNRS INCREASE et à partir de 2017, INCREASE a pris en charge l'organisation d'ISGC. Ce format semble attractif puisque, tout en restant un congrès scientifique, 35 à 40 % des participants sont des industriels, ce qui démontre à nouveau que

l'expertise scientifique, acquise et développée dans les laboratoires, est bien le socle de l'innovation.

Ce congrès a également permis de mettre les activités de l'IC2MP et de la FR CNRS INCREASE sur le devant de la scène, de tisser un réseau de collaborations à l'échelle internationale, réseau qui s'avère aujourd'hui indispensable pour mener à bien nos recherches et augmenter leur impact.

L'innovation, un catalyseur pour la recherche exploratoire

L'innovation

L'innovation est toujours difficile à appréhender. Par nature, elle est très risquée car nous évoluons dans des écosystèmes très dynamiques. Le rapprochement public-privé est certainement une option efficace pour créer de l'innovation, à condition toutefois d'inclure les deux parties dès la définition des projets de recherche. Pour le chercheur, ce partenariat peut modifier profondément sa vision sur une problématique scientifique ; il contribue par exemple à mieux identifier les grandes questions scientifiques auxquelles il est nécessaire de répondre et qui permettront, sur le long terme, de faire progresser la société. Pour l'industriel, cela lui permet d'accéder à un réseau d'expertise scientifique et de pouvoir anticiper plus facilement les verrous technologiques auxquels il fait face. Il est important de ne surtout pas opposer recherche dite fondamentale et recherche dite appliquée car il n'y a pas de frontière entre les deux mais un continuum.

Lever un verrou scientifique

Cela nécessite du temps, de nombreuses collaborations, des discussions, parfois des échecs, et il est nécessaire de réunir les mondes de l'industrie, de la recherche, de la finance et des pouvoirs publics pour réussir à transformer une recherche en un succès industriel. Malheureusement, le modèle économique de notre société, basé sur une rentabilité à court terme, n'est pas vraiment propice à l'innovation. Le transfert d'un résultat issu de la recherche d'un laboratoire vers l'industrie nécessite méthode et temps ; on le voit actuellement dans le cadre de la transition énergétique.

L'évaluation de la recherche

Même si elle évolue favorablement, notamment grâce à une forte impulsion du CNRS, l'évaluation de la recherche reste également un frein à l'innovation. En effet, à l'échelle internationale, la qualité des recherches est encore trop souvent indexée sur l'indice d'impact des journaux dans lesquels ces recherches sont publiées. Cela doit changer car l'indice d'impact des journaux n'est aucunement corrélé à l'impact des recherches. Si dans cet article, nous avons fait le choix

de focaliser la discussion sur le transfert « académie-industrie », il est important de souligner que cette recherche partenariale a également des conséquences directes dans d'autres domaines, comme par exemple la recherche de financements mais également l'ouverture vers le grand public. En effet, en alignant les grands défis scientifiques sur les grands problèmes sociétaux, il devient alors plus aisé de vulgariser la science et d'expliquer le rôle majeur de la recherche scientifique, souvent très abstraite pour le grand public.

La formation scientifique, la connaissance réciproque des milieux académique et industriel, la création de réseaux mixtes, la curiosité, l'écoute, l'échange et la capacité à rebondir sont très certainement les principaux critères de succès en termes d'innovation.

[1] www.euroconsulting.be/upload/news/documents/20150422055455_EC_Sugar_Platform_final_report.pdf

[2] J.P. Lange, Renewable feedstocks: the problem of catalyst deactivation and its mitigation, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2015**, *54*, p.13186-197.

[3] J.P. Lange, Catalysis for biorefineries-performance criteria for industrial operation, *Catal. Sci. Technol.*, **2016**, *6*, p. 4759-67.

[4] J.P. Lange, Towards circular carbo-chemicals – the metamorphosis of petrochemicals, *Energy Environ. Sci.*, **2021**, *14*, p. 4358-76.

[5] www.cellulenergie.cnrs.fr/autres-pepr/pepr-spleen

[6] F. Boissou, et al., Acid-assisted ball-milling of cellulose as an efficient pretreatment process for the production of butyl glycosides, *ChemSusChem*, **2015**, *8*(19), p. 3263-69.

[7] A. Karam et al., Conversion of cellulose to amphiphilic alkyl glycosides catalyzed by Aquivion, a perfluorosulfonic acid polymer, *ChemSusChem*, **2017**, *10*(18), p. 3604-10.

[8] A. Karam et al., Mechanocatalytic depolymerization of cellulose with perfluorinated sulfonic acid ionomers, *Front. Chem.*, **2018**, *22*(6), p. 74.

[9] J.F. Sierra Cantor et al., Mechanocatalytic depolymerization of hemicellulose to low molecular weight oligosaccharides over Aquivion ionomer, *RSC Sustain.*, **2023**, *1*, p. 446-453.

[10] R. Brière et al., Life cycle assessment of the production of surface-active alkyl polyglycosides from acid-assisted ball-milled wheat straw compared to the conventional production based on corn-starch, *Green Chem.*, **2018**, *20*, p.2135-41.

[11] <https://biosedev.com>

[12] A. Humblot et al., Conversion of ammonia to hydrazine induced by high frequency ultrasound, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2021**, *60*(48), p. 25230-234.

[13] A. Humblot et al., Sonochemically-induced reduction of alkenes to alkanes with ammonia, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2022**, *61*(51), e202212719.

[14] <https://ic2mp.labo.univ-poitiers.fr/isgc-2022-la-rochelle-may-16-20>

François JÉRÔME,

Directeur de recherche au CNRS, Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers, UMR 7285-CNRS, Université de Poitiers.

François JÉRÔME a reçu le prix Innovation 2023 de la division SCF Catalyse (DivCat).

* francois.jerome@univ-poitiers.fr



 Toute l'actualité de la
Société Chimique de France
et bien plus...
societechimiquedefrance.fr