

Chimie durable : quels sont les besoins en recherche pour les dix-quinze prochaines années ?

Dans le cadre de la fédération de recherche CNRS INCREASE [1], les industriels partenaires – ARD, Greentech, L'Oréal, Pennakem et Solvay – ont organisé en juillet dernier une rencontre à l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers. L'objectif était d'informer les chercheurs sur les verrous technologiques auxquels font face les industriels, ainsi que sur leurs attentes et besoins en termes de recherche exploratoire sur les dix-quinze prochaines années.

Quelques grands principes de précaution

Avec la surexploitation des ressources et la prise de conscience de l'impact de notre société sur la planète, l'industrie chimique fait face aujourd'hui à deux grands défis [2] :

- la substitution du carbone fossile par du carbone renouvelable (biomasse, carbone recyclé) ;
- la recherche de nouvelles technologies toujours plus performantes, sécuritaires et respectueuses de l'environnement.

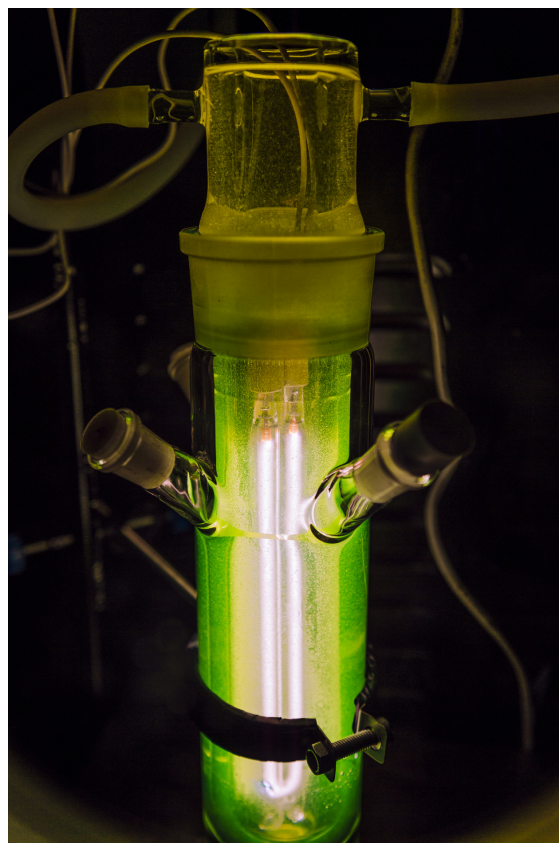
L'utilisation de la biomasse ou du carbone recyclé n'est en aucun cas un gage de durabilité et une analyse complète du cycle de vie (origine des matières premières, procédés de transformation, fin de vie) doit impérativement être réalisée afin de s'assurer de la pertinence de la voie envisagée ou développée en termes de développement durable. Sauf en cas de réglementation bannissant l'utilisation du carbone fossile, il est aujourd'hui préférable, plutôt que de faire du « pétro-identique » (filère dite « drop in »), de tirer profit de la fonctionnalité chimique présente dans la biomasse ou dans le carbone recyclé, afin d'amener de nouvelles propriétés/performances par rapport à l'existant, et donc d'ouvrir potentiellement de nouveaux marchés.

En effet, la filière « drop-in » présente l'avantage de ne pas perturber les procédés aval mais fait face aux procédés de production éprouvés de la filière issue du carbone fossile, rendant aujourd'hui les produits biosourcés encore trop peu concurrentiels économiquement pour les utilisateurs finaux. Par ailleurs, lorsqu'on veut substituer une matière première fossile par une ressource renouvelable, il est impératif de choisir une cible où le ratio $C_{\text{ressource}}/C_{\text{énergie}}$ sera maximal, l'énergie étant aujourd'hui principalement fossile à l'échelle de la planète. Ainsi, la mise sur le marché d'un produit chimique est toujours un compromis entre performance, profit et impact environnemental/sociétal.

Les différentes réglementations et législations permettent l'émergence de produits chimiques durables sur le marché en interdisant les produits chimiques nocifs pour la santé humaine et l'environnement, même ceux qui génèrent aujourd'hui des profits substantiels. Cependant, le processus d'enregistrement est lent et très coûteux, ce qui limite parfois la prise de risque dans le développement de nouveaux produits.

Quelles sont les attentes des industriels en termes de technologies et/ou d'outils ?

- **Le développement d'outils de modélisation**, pour prédire avec précision les performances techniques et applicatives, l'efficacité économique, les performances environnementales et sociétales d'un produit biosourcé ou d'origine recyclée. En effet,



Réacteur photocatalytique pour l'oxydation de sucres d'origine végétale.
© Cyril FRESILLON/IC2MP/INCREASE/CNRS Photothèque.

ces aspects doivent être anticipés le plus en amont possible des projets de recherche. Dans ce contexte, des progrès sont attendus dans le domaine de la modélisation prédictive et de l'intelligence artificielle. Des actions communes entre les mondes académique et industriel ont démarré, le rapprochement avec celui des sciences mathématiques et informatique étant une priorité.

- **Un effort important sur des réactions et procédés performants de transformation de la biomasse** : s'il existe aujourd'hui une quantité importante de publications sur la synthèse de produits chimiques biosourcés ou d'origine recyclée, le nombre d'exemples atteignant le stade pilote et/ou commercial reste très faible. En effet, de manière à contrôler plus finement la sélectivité des réactions, mais également pour éviter la désactivation des (bio)catalyseurs, les processus de transformation étudiés à l'échelle académique ont généralement lieu en milieu très dilué (< 5 % en poids). Si des rendements et des sélectivités en phase avec les attentes industrielles sont obtenus, la productivité des réactions mises en œuvre reste quant à elle trop faible par rapport aux attentes des industriels. Ainsi, le développement de procédés/réactions capables de convertir **sélectivement** des solutions concentrées de substrats renouvelables (> 10-15 % en poids) est un verrou important à lever pour favoriser l'émergence de produits renouvelables sur le marché. Des progrès sont ainsi attendus sur la recherche de nouveaux (bio)catalyseurs, disponibles à grande échelle, stables en phase aqueuse, résistant aux

variations de pH, actifs à basses températures, et bien entendu sélectifs. Des progrès dans le couplage de la catalyse « chimique » à la catalyse enzymatique sont également attendus, en gardant à l'esprit que pour certaines applications, l'utilisation d'enzymes OGM est interdite.

- **Repenser le mode d'activation des substrats biosourcés ou d'origine recyclée** est également un domaine pour lequel des avancées scientifiques et technologiques sont attendues. En particulier, le développement de technologies alternatives issues de la physique telles que le broyage, les ultrasons, le plasma, l'électrochimie, la photochimie, les fluides supercritiques, l'extrusion, les micro-ondes, etc., conduit à des résultats prometteurs car ces technologies permettent bien souvent de limiter la quantité de solvant utilisé, de raccourcir les temps de réactions, etc. Cependant, si ces technologies permettent d'activer des substrats à plus basses températures que les procédés chimiques plus classiques, elles coûtent quand même en énergie et mettent en œuvre des espèces très réactives (ions, électrons, photons...), rendant complexe un contrôle fin de la sélectivité des réactions. Ainsi, des innovations importantes sont également attendues dans le couplage de ces technologies émergentes avec la (bio)catalyse, de manière à tirer profit d'un effet de synergie entre activation à basse température et sélectivité (concept de catalyse assistée).

- **Minimiser la dépense énergétique des procédés** est bien souvent au cœur des problématiques industrielles. La miniaturisation des procédés, et plus globalement l'intensification des procédés vers des systèmes continus en phase liquide ou vapeur (préférentiellement liquide), reste une problématique pour laquelle les besoins industriels en termes d'innovation sont importants.

Quelles sont les réactions/procédés cibles ?

- Les procédés de fractionnement de la biomasse lignocellulosique pour un accès aux sucres et à de potentiels aromatiques : sont recherchés plus particulièrement de nouvelles voies d'accès à plus faible CAPEX pour accéder à des jus sucrés plus concentrés, obtenir des productivités de réacteur et des sélectivités plus élevées, et améliorer les procédés de purification.

- Des catalyseurs stables, productifs et sélectifs pour des réactions d'hydrolyse, d'acylation, d'estérification et autres réactions dans l'eau, et pour les réactions d'hydrogénation, d'hydrogénolyse, d'amination et d'oxydation ménagée.

- Des solvants biosourcés, pour remplacer les solvants pétrosourcés en synthèse organique ou process pharma.

- Des technologies de recyclage/« upcycling » des polymères.

- Des procédés de bioremédiation pour les composés organiques persistants.

Quelles sont les grandes familles de molécules cibles ?

- Les tensioactifs biosourcés, issus d'approvisionnements différents (sans huile de palme, déchets valorisés, etc.), conduisant à de nouvelles structures avec des performances, des coûts et un profil environnemental supérieurs aux pétrosourcés.

- Les synthons aromatiques biosourcés, incluant les composés (poly)phénoliques, qui sont une cible industrielle stratégique.

- La synthèse de polymères biodégradables pour lesquels il y a une forte demande (poly- et oligosaccharides par exemple), ainsi que le développement de nouvelles technologies « propres » permettant leur fonctionnalisation sélective (oxydation, amination), l'objectif ultime étant de mettre au point des produits à dégradabilité contrôlée et déclenchable par une sollicitation chimique ou physique.

- Les furanes, cibles de grand intérêt, notamment le furfural et ses dérivés pour la synthèse de solvants ou de monomères biosourcés. En matière d'innovation, les industriels ont des besoins dans la recherche de nouveaux procédés de fonctionnalisation en position 2 et 5, l'ouverture catalytique et sélective du cycle furanique mono- ou disubstitué pour obtenir des composés d'intérêt (alcool, diols, cétones, etc.), et dans la recherche de catalyseurs d'hydrogénation, d'hydrogénolyse, d'amination et d'oxydation modérée plus performants. L'acide lévulinique et le 5-hydroxyméthylfurfural sont des molécules d'intérêt mais les procédés actuels ne sont pas compétitifs en termes de sélectivité, conversion, productivité et purification ; des innovations sont également attendues dans ce domaine.

- Des synthons issus de matières premières recyclées.

- De nouvelles phases minérales pour la synthèse de produits durables avec des propriétés optiques (pigments, photoprotection, etc.), électromagnétiques, ou pour des applications matériaux/procédés tels que la silice, les carbonates, etc.

Bilan et actions

Cette rencontre a permis de mettre en lumière l'importance, voire la nécessité, que les mondes académique et industriel échan- gent ensemble de manière plus importante sur les probléma- tiques de recherche en amont (et non uniquement de transfert). L'émergence d'une chimie plus durable nécessite de surmonter de nombreux verrous scientifiques et technologiques, et cela prendra du temps. Faciliter les échanges public-privé sur ces questions de recherches exploratoires est indispensable pour accélérer l'émergence d'une chimie plus durable. Nous sommes tous intimement convaincus que l'innovation scientifique émergera à la frontière de plusieurs champs disciplinaires, mais faut-il encore apprendre à se parler avec un vocabulaire parfois différent. Par exemple au sein même de la chimie, on parle de chimie verte, bleue, blanche... mais la chimie n'a pas de couleur, elle est durable ou elle ne l'est pas, et cela se mesure avec précision désormais. Par ailleurs, des actions doivent être également menées vers le grand public qui a besoin d'être rassuré et informé sur les futures innova- tions scientifiques. Dans le cadre de la mise en place d'une écono- mie circulaire, la chimie peut devenir une science participative ; c'est le cas par exemple au travers du tri des déchets ménagers, mais peu de personnes en sont conscientes. Il est urgent d'infor- mer le grand public que la chimie joue un rôle central dans la mise en place d'un développement plus durable de notre société ; la chimie est d'ailleurs l'une des rares sciences associée au mot durable. Un produit, aussi vertueux, rentable et performant soit-il, ne pourra émerger sur le marché sans que le consommateur ne soit convaincu.

[1] Créé par le CNRS avec le soutien de la Région Aquitaine Limousin Poitou-Charentes et inauguré en 2016 à Poitiers, INCREASE est un réseau collaboratif public-privé dédié à l'écoconception et aux ressources renouvelables. Il réunit aujourd'hui près de cent chercheurs issus de huit laboratoires de recherche, et des industriels de la chimie dans des secteurs comme la cosmétique, l'agroalimentaire ou la détergence (<https://increase-research.fr>).

[2] P. Marion, B. Bernela, A. Piccirilli, B. Estrine, N. Patouillard, J. Guilbot, F. Jérôme, Sustainable chemistry: how to produce better and more from less?, *Green Chem.*, 2017, 19, p. 4973-989.

François JÉRÔME*

Directeur de recherche, Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers, et directeur de la fédération de recherche FR CNRS INCREASE.

Patrick MAESTRO,

Directeur scientifique Recherche et Innovation chez Solvay, animateur du club d'industriels de la FR CNRS INCREASE.

* francois.jerome@univ-poitiers.fr