

Comment les chimistes contribuent-ils à l'économie circulaire ?

Les cinq niveaux de contribution de la chimie à l'économie circulaire

Le concept d'économie circulaire est beaucoup plus large que l'unique contribution de la chimie, même si les chimistes ont un rôle clé à jouer dans le développement de cette économie. En effet, l'économie circulaire constitue une opportunité réelle de durabilité pour notre système économique, sociétal et environnemental actuel, mais également une source d'innovation pour les chercheurs académiques et industriels. Une échelle de cinq niveaux de contribution de la chimie à l'économie circulaire a ainsi été définie [1] :

- Niveau 1 : chimie verte et synthèses/procédés éco-compatibles pour limiter l'impact environnemental négatif de la chimie ;
- Niveau 2 : simplification des synthèses et limitation de la complexité des produits, efficacité optimisée de la consommation des ressources ;
- Niveau 3 : innovations, nouvelles technologies, nouvelles voies de valorisation et nouveaux concepts ;
- Niveau 4 : bilans environnementaux et économiques plus systématiques et généralisés, en particulier les analyses de cycle de vie à l'échelle laboratoire ;
- Niveau 5 : considération des problématiques et opportunités avec une vision locale et globale, associée à une approche multi-partenaire et pluridisciplinaire.

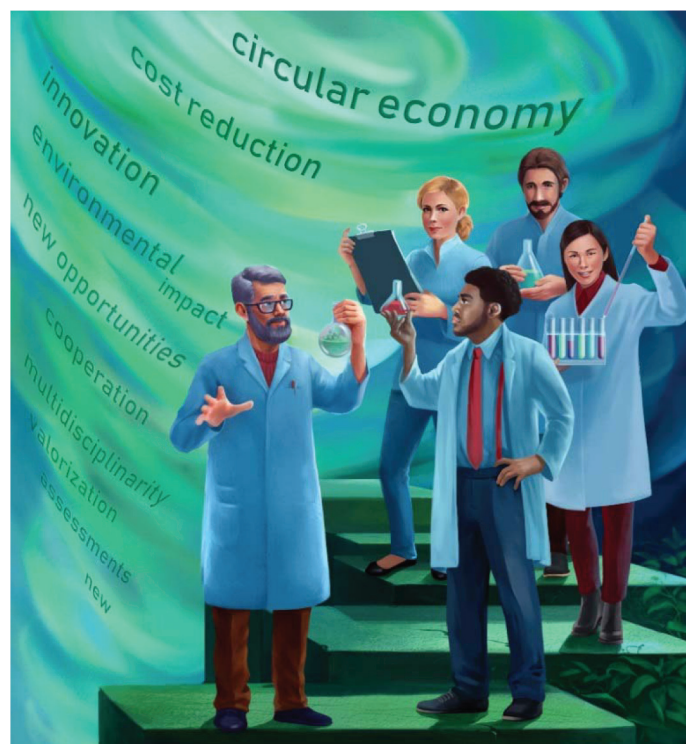
La chimie peut contribuer à chacun de ces niveaux, mais plus le niveau atteint est élevé, et plus les projets associés intégreront une dynamique d'économie circulaire.

Niveau 1 - Une chimie toujours plus verte !

Le concept de chimie verte proposé par Anastas et Warner à la fin des années 1990 est fondamentalement basé sur la prévention de la pollution par la réduction des déchets et la suppression des substances dangereuses [2]. La prise en compte de l'économie d'atomes et du facteur E dans les synthèses, le rôle de la catalyse pour éviter la manipulation de quantités stœchiométriques de réactifs et l'utilisation de ressources renouvelables peuvent constituer un premier niveau de contribution de la chimie à une économie plus circulaire. Les douze principes de l'ingénierie verte d'Anastas et Zimmerman sont venus compléter ces aspects au niveau industriel, *via* un ensemble de méthodologies visant à prévenir le gaspillage, économiser l'énergie, réduire l'impact environnemental des procédés développés et promouvoir des systèmes conçus en prenant en compte la fin de vie des produits [3].

Niveau 2 - Simplification générale !

Il est essentiel de réduire au minimum la complexité des produits dès leur conception pour permettre leur recyclage, en assurer la traçabilité et développer des indicateurs



d'économie circulaire dédiés. Dans cette optique, les produits multi-composants ou multi-matériaux difficiles à séparer (exemple des mélanges de métaux ou de solvants) sont à éviter. Il faut donc concevoir de nouveaux produits acceptés par les consommateurs ou modifier les préparations de ces produits.

Niveau 3 - Les innovations de la chimie en première ligne !

Les innovations en synthèse et préparation de molécules, matériaux et polymères, ainsi que les avancées en chimie analytique sont au cœur des procédés chimiques pouvant participer à une économie plus circulaire. Ainsi, les récents progrès de la catalyse et de la nanocatalyse, les nouveaux outils d'intensification des procédés, le développement d'applications dans des milieux réactionnels plus éco-compatibles (eau, eutectiques profonds, liquides ioniques, fluides supercritiques, etc.) ou en combinaison avec des méthodes physiques d'activation (microondes, photochimie, mécano-chimie, sonochimie, plasmas, etc.) sont et seront à l'origine de nouvelles contributions à l'économie circulaire, par leurs approches vertueuses et innovantes.

Par exemple, nous avons développé au laboratoire un procédé sonochimique en continu pour valoriser les plantes exotiques envahissantes telles que la renouée du Japon dont les déchets d'arrachage ne trouvent aujourd'hui plus d'exutoire [4-5]. Ce travail de recherche a conduit à la création d'une startup en 2018 dont l'objectif était de mettre en place une nouvelle filière de récupération et de valorisation

chimique des rhizomes, partie souterraine de la plante (figure 1).

En effet, les ultrasons de puissance fournissent des conditions énergétiques et un environnement physico-chimique favorables pour traiter cette biomasse et permettre l'extraction et la transformation *in situ* de molécules d'intérêt industriel, en particulier des polyphénols utilisés en cosmétique et en nutraceutique (figure 2). Le résidu d'extraction pourra quant à lui conduire à une valorisation agronomique permettant d'utiliser 100 % du rhizome de départ, afin de boucler la boucle.

Plus globalement, la valorisation des rhizomes de renouée du Japon a un impact positif sur la préservation de la biodiversité en contribuant à la multiplication de nouveaux sites d'arrachage comme levier dans la lutte contre la prolifération de cette plante envahissante.

Niveau 4 - On fait le bilan !

L'analyse de flux de matières (et d'énergie) est un outil d'aide à la compréhension des systèmes qui se base sur une approche comptable des flux et sur les principes de conservation de la masse (et de l'énergie). Cet outil a joué un grand rôle dans le développement industriel, mais a connu un regain d'intérêt avec l'émergence des problématiques environnementales.



Figure 1 - Le projet RENOUEUR a permis de travailler du site d'arrachage jusqu'au laboratoire sur une grande quantité de rhizomes, permettant ainsi de mieux appréhender des problématiques concrètes d'exploitation, comme la nécessité de nettoyer, stocker et broyer le matériel végétal avant son utilisation.



Figure 2 - Différentes étapes de la transformation du rhizome jusqu'à l'obtention de la molécule de resvératrol, polyphénol utilisé en cosmétique et nutraceutique.

Un autre concept intéressant est la symbiose industrielle (appelée aussi écologie industrielle et territoriale, EIT), où les déchets des uns deviennent les matières premières des autres. Elle peut résoudre, sur un territoire ciblé, les problèmes d'élimination des déchets et de la demande en ressources primaires [6].

Dans ces deux approches, la maîtrise des flux et des matières en quantité mais également en qualité (pureté, propriétés physico-chimiques, etc.) permet de mieux gérer la réutilisation des produits chimiques et des déchets, en interne ou en symbiose entre plusieurs industries. Dans ce cadre, un niveau important de transparence, une grande coordination et la mise en place d'outils de traçabilité efficaces sont essentiels.

L'analyse de cycle de vie (ACV) des produits et des procédés est également essentielle. Il est donc recommandé d'utiliser l'ACV plus tôt dans les processus de conception, dès l'échelle laboratoire. Notre communauté scientifique a donc besoin de développer ces expertises et de former les futurs chimistes à ces pratiques dans les études supérieures.

Niveau 5 - Des approches locales et globales à développer !

Des rencontres ou des événements déclencheurs sont souvent à l'origine de nouvelles opportunités conduisant à la mise en place de projets d'économie circulaire sur un territoire. Par exemple, le projet VITIVALO, que coordonne notre laboratoire sur le territoire Savoie Mont Blanc, est une illustration de ce type de projet multi-partenarial et pluridisciplinaire associé à un territoire [7]. En effet, un arrêté préfectoral a interdit fin 2017 le brûlage à l'air libre des déchets agricoles, source d'émission de particules fines. Cette pratique utilisée depuis des décennies permettait d'éliminer les déchets de type bois de la viticulture et des pépinières viticoles. Notre doctorante a d'abord démontré que les sarments savoyards ont un potentiel important en molécules d'intérêt, en particulier deux molécules aux propriétés antioxydantes, le *trans*-resvératrol et la *trans*- ϵ -viniférine, en quantités plus importantes ou équivalentes dans les cépages savoyards (Jacquère et Mondeuse) par rapport au Pinot noir, considéré comme le cépage de référence [8-9]. Nos travaux se sont également penchés sur l'évaluation des méthodes d'éco-extraction impliquant les ultrasons ainsi que sur l'impact des conditions de stockage, du broyage et des conditions de préparation des déchets avant extraction. Des protocoles ont donc été établis pour le stockage et la préparation des déchets viticoles et le potentiel d'extraction à l'échelle laboratoire a été démontré (figures 3 et 4).

Le laboratoire travaille avec différents pôles de compétitivité et des entreprises de la région Auvergne-Rhône-Alpes en nutraceutique et en cosmétique pour développer avec ces partenaires la mise à l'échelle et sur le marché des molécules produites. Cependant, une valorisation unique n'aurait pas été viable aux niveaux économique et environnemental ; c'est pourquoi une cascade de valorisations, dont la première étape est l'extraction de molécules à haute valeur ajoutée, a été proposée. En effet, nous avons travaillé avec différents laboratoires et entreprises partenaires pour valoriser les résidus solides issus de l'extraction en tant que compost industriel, matériaux isolants ou renforts dans des matériaux composites. L'établissement d'ACV comparatives est également prévu dans le projet afin d'évaluer l'implantation de cette nouvelle filière à mettre en place sur le territoire.

DÉCHETS ISSUS DE LA VITICULTURE



Sarments



Souches de vigne

DÉCHETS ISSUS DE PÉPINIÈRES VITICOLES



Plants de vigne



Déchets de coupe

Figure 3 - Déchets viticoles et de pépinières viticoles ciblés dans le projet VITIVALO.

En résumé, grâce à cette approche plus large engagée dans le projet VITIVALO, nous avons pu, en tant que chimistes, mieux appréhender les enjeux du projet global, en comprenant les pratiques et contraintes des professionnels, et finalement nous avons pu innover différemment qu'avec une approche uniquement focalisée sur la chimie. Ici, les conséquences de ce type de projet d'économie circulaire sont multiples et globales, avec la réduction de l'impact sur la qualité de l'air, l'accompagnement à l'évolution des pratiques des métiers de viticulteurs et de pépiniéristes viticoles, l'aide à la décision pour les pouvoirs publics, la création d'une nouvelle filière locale avec des impacts économiques potentiels sur le territoire.

Développer de nouveaux modèles économiques ?

De nouveaux modèles économiques peuvent également émerger à travers l'économie de fonctionnalité où les clients paient pour l'utilisation des produits et non pour leur possession. Plutôt que de vendre des produits et de générer des déchets, dont la traçabilité et la séparation sont souvent difficiles à mettre en place, un changement de paradigme permettrait aux clients d'utiliser un objet ou un produit. En effet, ce dernier restera la propriété de l'entreprise qui l'exploite, facilitant sa traçabilité et sa recyclabilité.

Dans un récent article publié dans *L'Actualité Chimique*, nous avons discuté différentes voies de valorisation du marc de café [10]. Nous développons en particulier au laboratoire des procédés de valorisation impliquant les fluides supercritiques. Dans ce projet, nous travaillons avec une entreprise locale qui collecte le marc de café dans les restaurants du territoire. La majorité de ces restaurants étant approvisionnés en café par la même entreprise, nous pourrions imaginer qu'au lieu de vendre du café, cette entreprise vende un « service de café ». Après son utilisation en restaurant, l'entreprise pourrait récupérer le marc de café pour faciliter son recyclage ou sa réutilisation, en gardant une traçabilité complète du produit. Plus que des déchets de restaurant, le marc deviendrait alors



Figure 4 - Une expérimentation en plein air a été réalisée pendant six mois pour étudier la valorisation agronomique des résidus de déchets viticoles.

un sous-produit précieux de l'entreprise qui propose du café, levant ainsi certains verrous réglementaires liés au statut de déchet. Une idée à explorer dans le cadre de l'économie circulaire...

Les quelques exemples donnés ici ont montré qu'une approche plus territoriale peut répondre à des problématiques locales et servir de démonstrateurs. En plus d'avoir un sens en termes de limitation des transports de matières, de création d'emplois dédiés et de mise en place d'une nouvelle économie locale, ces initiatives peuvent ensuite être répliquées dans d'autres territoires et avoir un impact global. Pour conclure, l'économie circulaire continuera de booster la recherche développée par les chimistes ; alors continuons d'innover !

[1] G. Chatel, Chemists around the world, take your part in the circular economy!, *Chem. Eur. J.*, **2020**, 26, p. 9665-9673, <https://doi.org/10.1002/chem.202002327>.

[2] P.T. Anastas, J.C. Warner, *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, **1998**.

[3] P.T. Anastas, J.B. Zimmerman, Design through the 12 principles of green engineering, *Environ. Sci. Tech.*, **2003**, 37, p. 94A-101A.

[4] G. Chatel, R. Duwald, C. Piot, M. Draye, Valorisation chimique et économique des renouvelés asiatiques : quelle stratégie pour une gestion durable ?, *Sciences Eaux & Territoires*, **2019**, 27, p. 102-107.

[5] G. Chatel, R. Duwald, M. Draye, P. Fanget, C. Piot, Brevet FR 20 06171, **2020**.

[6] ADEME, L'écologie industrielle et territoriale, www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-industrielle-services/passer-a-l'action/lecologie-industrielle-territoriale (consulté le 03/09/2020).

[7] www.vitivalo.univ-smb.fr (consulté le 03/09/2020).

[8] M. Zwingelstein, M. Draye, J.-L. Besombes, C. Piot, G. Chatel, *Trans-resveratrol and trans-e-viniferin in grape canes and stocks originating from Savoie Mont Blanc Vineyard Region: pre-extraction parameters for improved recovery*, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2019**, 7, p. 8310-8316.

[9] M. Zwingelstein, M. Draye, J.-L. Besombes, C. Piot, G. Chatel, *Viticultural wood waste as a source of polyphenols of interest: opportunities and perspectives through conventional and emerging extraction methods*, *Waste Manag.*, **2020**, 102, p. 782-794.

[10] A. Vandeponseele, M. Draye, G. Chatel, Le marc de café : nouvel or brun des chimistes ?, *L'Act. Chim.*, **2020**, 451, p. 29-33.

Grégory CHATEL,

Maître de conférences HDR au Laboratoire de Chimie Moléculaire et Environnement (LCME), Université Savoie Mont Blanc. Le LCME intégrera au 1^{er} janvier 2021 l'UMR EDYTEM (Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne, Université Savoie Mont Blanc/CNRS) suite à la fusion des deux laboratoires.

*gregory.chatel@univ-smb.fr