



HAL
open science

Livre blanc sur l'Ingénierie Circulaire: Procédés et Chimie pour une industrie durable ancrée dans son territoire - SFGP

Nicolas Nicolas ROCHE, Jack Legrand

► To cite this version:

Nicolas Nicolas ROCHE, Jack Legrand. Livre blanc sur l'Ingénierie Circulaire: Procédés et Chimie pour une industrie durable ancrée dans son territoire - SFGP. Société Française de Génie des Procédés. 2023. hal-04881379

HAL Id: hal-04881379

<https://amu.hal.science/hal-04881379v1>

Submitted on 12 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INGENIERIE CIRCULAIRE

Procédés et Chimie pour une industrie durable ancrée dans son territoire

Livre Blanc

coordonné par Nicolas Roche et Jack Legrand

Société Française de
Génie des Procédés



L'Ingénierie Circulaire pour une réindustrialisation durable

Le Génie des Procédés face à de nouveaux défis

On a coutume de présenter l'ingénieur en Génie des Procédés comme l'architecte de l'usine. La transformation de la matière est d'abord caractérisée par le chimiste en termes de mécanismes réactionnels et de cinétique ; l'ingénieur en Génie des Procédés intervient ensuite afin de maîtriser la réaction à plus grande échelle, en contrôlant les transferts de matière et d'énergie et en orientant vers les technologies adaptées. L'atelier de production enchaîne alors différentes opérations unitaires pour obtenir le produit attendu en quantité et en qualité. Cette approche du développement de procédé est à l'origine de l'économie linéaire du XXème siècle qui, grâce à une énergie abondante et bon marché, a donné accès au plus grand nombre à des richesses nouvelles, dans tous les domaines : eau potable, alimentation, santé, énergie, biotechnologie, transport, logement... Ces progrès, obtenus dans un temps étonnamment court à l'échelle de l'humanité, ont pu conduire à une confiance aveugle en une science capable de répondre à des besoins nouveaux, toujours plus nombreux et souvent considérés comme essentiels au bonheur. Nous connaissons la suite de l'histoire... Cet essor économique insuffisamment contrôlé a engendré des conséquences néfastes sur le long terme, pour ces mêmes éléments de progrès recherchés, santé humaine et environnement au premier chef. L'hyper consommation se heurte maintenant à la finitude des ressources et le modèle économique de mondialisation qui lui est associé montre aujourd'hui ses limites en termes de développement des territoires et d'impact environnemental. Autre dommage majeur, la Science elle-même est remise en question et l'on voit se développer les sciences occultes et l'obscurantisme dans un monde pourtant dominé par la technologie. Déjà se font jour de premières difficultés pour attirer les talents vers les carrières scientifiques.

L'heure n'est plus au questionnement sur la réalité des dommages ou à la désignation des responsables. Il s'agit de répondre aux attentes nouvelles, individuelles et collectives : réduction de notre impact environnemental, décarbonation de la production, maîtrise du cycle de vie des produits, mais aussi développement des territoires et réindustrialisation. On parle de transformation écologique, prenant en compte l'évolution des comportements : usage versus propriété, recyclé versus neuf, sobriété versus consommation. Les défis à relever sont nombreux : transition énergétique, transition numérique, bio et agro-ressources, santé, environnement, sécurité, **économie circulaire**.

L'Ingénierie Circulaire : un nouveau concept du Génie des Procédés

L'économie circulaire intègre dans ses concepts même les fondements du Génie des Procédés : approche systémique, bilan matière, bilan énergie, optimisation, gestion des flux. Le Génie des Procédés est donc naturellement un élément essentiel à la construction de ce nouveau modèle économique. Le développement de l'économie circulaire doit permettre de diminuer le prélèvement des ressources, la production de déchets et la consommation d'énergie. Elle vise à mettre en place un nouveau modèle de société, qui trie, recycle, valorise, optimise les stocks et les flux de matières, d'énergie et de déchets, en intégrant la notion de partage des flux entre les différents usagers ou les différents sites industriels inter-connectés.

Cette économie circulaire ne verra le jour qu'à la condition d'une réelle éco-conception du produit intégrant la production, les usages successifs, la fin de vie, mais aussi les échanges entre les différents sites de production pour minimiser l'impact environnemental et répondre aux impératifs sociétaux d'un développement durable et décarboné. L'éco-conception du produit doit ainsi s'intégrer à l'éco-conception de l'usine, elle-même faisant partie d'un éco-parc industriel inscrit dans son territoire. Cette démarche systémique et multi-échelle est un préalable nécessaire au développement de l'économie circulaire : elle est au cœur du Génie des Procédés et nous la désignons par le concept d'**Ingénierie Circulaire**.

L'Ingénierie Circulaire : la SFGP se mobilise !

C'est face à ces nouveaux défis et pour accompagner une réindustrialisation durable et compétitive, que la Société Française de Génie des Procédés (SFGP) a décidé de développer le concept d'Ingénierie Circulaire. Ce travail vient en continuité avec le livre blanc "Usine du futur pour les industries de Procédé", disponible sur notre site web <https://www.sfgp.asso.fr/>. Il fait également suite à notre journée de prospective industrielle « Cathala-Letort », tenue à Paris fin 2021 : « L'Ingénierie Circulaire : une brique essentielle de l'économie circulaire ».

Cette journée a montré que l'Ingénierie Circulaire doit en effet être considérée comme l'une des briques de l'économie circulaire, dans laquelle le Génie des Procédés est étroitement impliqué. Elle a également permis d'identifier les principaux enjeux industriels de l'Ingénierie Circulaire : éco-conception des procédés, approvisionnement durable des ressources, écologie industrielle et territoriale, allongement de la durée d'usage, décarbonation et valorisation du CO₂, eau, énergie, agro-industries. Les enjeux académiques et ceux de la formation ne sont pas moins importants et notre étude montre quelles sont les réponses en place ou à construire.

Les exemples mis en avant dans le document témoignent d'un dynamisme réel en France, avec une certaine maturité des approches et des réalisations industrielles concrètes. Un partenariat fort est déjà établi entre les mondes académique et industriel, sur de nombreux domaines de l'économie circulaire. Là encore, les enjeux sont clairs : tout produit auparavant destiné à l'abandon ou rejeté, doit désormais être considéré comme une ressource disponible. Le développement de nouvelles compétences croisées, l'association de filières industrielles, l'éco-conception et les efforts réalisés dans le domaine des matériaux, ouvrent des perspectives d'innovation et de réduction des coûts pour que cette ressource potentielle devienne une réelle matière première secondaire. Sur ce point, les problématiques liées à une évolution nécessaire de la législation actuelle, nationale ou européenne, ont été pointées comme un frein majeur à la démarche, tout comme celles liées aux questions économiques et sociétales.

Pour aller plus loin, je vous invite à découvrir notre concept d'Ingénierie Circulaire dans ce nouveau livre blanc de la SFGP.

François NICOL

Président

Société Française de Génie des Procédés

Préface

L'économie linéaire qui s'est structurée avec l'avènement de la société industrielle de production et de consommation de masse, en Europe et aux États-Unis depuis le début du 20ème siècle, sur tous les continents depuis 50 ans, a permis de sortir de la pauvreté une partie majeure de la population, d'allonger la durée de vie des femmes et des hommes en bonne santé comme jamais l'humanité n'avait connue, de sortir d'un avilissement à la Nature qui rendait précaires les structures des sociétés.

Cependant l'accélération du couple infernal d'hyper consommation exigeant une production mondialisée et débridée, entraîne cette même humanité à sa perte face à la finitude réelle des ressources accessibles et de l'équilibre planétaire.

Nous devons revoir nos modèles, s'inspirer de ceux qui ont permis résilience et durabilité à des communautés humaines depuis toujours et les projeter dans un monde tel qu'il est aujourd'hui avec les attentes des citoyens, les progrès encore à accomplir, les solutions, les technologies et les sciences cumulées.

L'économie circulaire telle qu'elle est pensée depuis des décennies, notamment par le précurseur Walter Stahel, intégrée dans la réalité de notre société et projetée pour une approche de respect et d'intelligence d'usage des ressources reste à bâtir.

Elle exigera des évolutions dans les concepts de consommation, questionnant la notion de propriété, une remise en cause des incitations marketing et commerciales, des dimensions spatiales plus localisées aux réalités physiques et sociétales de chaque lieu.

Les flux ne seront pas les mêmes, les interactions entre acteurs, à commencer par les industries, et les allers-retours avec le stock des produits déjà fonctionnels, vont pivoter, parfois orthogonalement aux modèles dominants.

L'Ingénierie Circulaire doit avoir une place centrale dans la construction de nouveaux modèles que ce soit pour l'écoconception des nouveaux produits manufacturés jusqu'à l'ensemble des boucles retour de l'économie circulaire.

Ainsi partager l'usage s'appuie sur des produits pensés et adaptés pour une multitude d'utilisateurs aux comportements différents. Si rien n'est pensé en amont, les objets ne pourront atteindre un nombre conséquent de rotations d'usage. Mais aussi comment assurer maintenance préventive et curative à efficacité technique et économique dans ces boucles retour ?

La réutilisation des composants, souvent fabriqués 10 ou 20 ans auparavant, n'est pas naturelle et leur conception originelle est souvent décalée des besoins d'aujourd'hui. Anticiper et adapter exigent une capacité d'ingénierie qui reste à structurer, notamment au niveau de la conception.

On doit aussi aborder la « circularité haute » qui va de l'amélioration des performances originelles d'un produit, le up-grade (surcyclage), jusqu'à l'intensification d'usage. Il est ainsi impossible de reprendre un produit manufacturé pour renforcer son utilisation, originellement pensé pour un certain niveau d'usage, sans y réallouer du temps ingénieur afin de s'assurer de sa capacité à l'allongement de sa durée de vie, d'offrir de nouvelles fonctionnalités et qu'il puisse être plus intensément utilisé.

La dernière boucle, extrêmement précise et complexe, autour du recyclage matière, est à renforcer scientifiquement. Face à l'utilisation quasi complète des éléments de la table de Mendeleïev et surtout à l'intrication des éléments chimiques entre eux, la récupération des matières premières est de plus en plus hors d'atteinte de nos capacités techniques et organisationnelles actuelles.

L'Ingénierie Circulaire est le cœur de la nouvelle approche de l'économie circulaire abordée par la supply-chain circulaire. Le renforcement des expertises en la matière est impératif, son couplage avec les procédés industriels actuels et futurs, tout autant que pour les nouveaux modèles d'affaires d'économie circulaire fondés sur les stocks de produits déjà en fonction.

Les travaux de la Société Française de Génie des Procédés avec ce livre blanc de l'Ingénierie Circulaire sont indispensables sur le chemin de l'économie circulaire profonde qui reste à mettre en œuvre.

François-Michel Lambert

Fondateur de l'Institut national de l'économie circulaire

Co-fondateur de l'Association Interdisciplinaire Française pour la Recherche en Économie Circulaire

Ancien député

Sommaire

Avant-propos	
Préface	
Introduction	1
1. Les éco-systèmes de l'Ingénierie Circulaire	4
2. Les enjeux académiques	5
3. Les enjeux industriels	6
4. Les grands domaines de l'Ingénierie Circulaire	7
a. Eco-conception des procédés	7
b. Approvisionnement durable des ressources, recyclage	8
c. Ecologie industrielle et territoriale	11
d. Allongement de la durée d'usage	16
e. Décarbonation et CO2	17
f. Eau	19
g. Energie	22
h. Agro-industries	23
5. Pivoter vers l'industrie circulaire	26
Conclusion, recommandations et perspectives	31
Annexe	35

Introduction

L'Ingénierie Circulaire a pour objet les méthodes d'ingénierie dédiées à la création d'activités contribuant à la mise en place de circuits économiques de transformation de la matière en flux fermés, usuellement identifiés comme étant de « l'économie circulaire ». Il n'est alors pas étonnant de constater que l'Ingénierie Circulaire intègre dans ses concepts même les fondements et paradigmes du Génie des Procédés et du Génie Chimique : approche systémique, bilan matière, bilan énergie, modification chimique de la matière, optimisation, gestion des flux, modélisation et optimisation. C'est donc par une évolution des besoins sociétaux que la science du Génie des Procédés et du Génie Chimique est presque naturellement devenue un élément essentiel dans la mise en place et le développement nécessaires de l'économie circulaire. L'économie circulaire, on le sait doit permettre de diminuer le prélèvement et l'impact sur les ressources, de réduire la production de déchets et de restreindre la consommation d'énergie. Mais fondamentalement elle vise à mettre en place un nouveau modèle de société, qui économise, trie, recycle ou valorise, réemploie, optimise les stocks et les flux de matières, d'énergie et de déchets en intégrant la notion de partage des flux entre les différents usagers ou entre différents sites, industriels ou autres, interconnectés.

C'est un champ en pleine expansion en raison de ses multiples opportunités et facettes. Raisonner et travailler dans ce champ requiert une approche fine et holistique des concepts qu'il met en œuvre. Dans ce que l'on appelle l'Ingénierie Circulaire, les concepts sont pour la plupart ceux du Génie des Procédés. Ils apportent à l'économie circulaire les éléments indispensables de diagnostic et les métriques essentielles liés aux développements de procédés optimisés y compris concernant la mise en place des filières de recyclage, lesquelles touchent la plupart des secteurs industriels.

La transition de l'ingénierie linéaire à l'Ingénierie Circulaire ne peut pas être pensée sans la prise en compte des impacts environnementaux, économiques et sociaux territoriaux. La problématique de la soutenabilité de la circularité doit être posée dans toutes ses dimensions.

Les activités du Génie des Procédés sont donc en phase avec les piliers de l'économie circulaire, qui sont les suivants :

L'**approvisionnement durable** (extraction/exploitation et achats durables) concerne le mode d'exploitation/extraction des ressources visant une exploitation efficace des ressources en limitant les rejets d'exploitation et l'impact sur l'environnement notamment dans l'exploitation des matières énergétiques et minérales (mines et carrières) ou dans l'exploitation agricole et forestière tant pour les matières/énergie renouvelables que non renouvelables. Ce pilier recouvre les éléments relatifs aux achats privés et publics (des entreprises et des collectivités).

L'**écoconception** vise, dès la conception d'un procédé, d'un bien ou d'un service, à prendre en compte l'ensemble du cycle de vie en minimisant les impacts environnementaux.

L'**écologie industrielle et territoriale**, dénommée aussi symbiose industrielle, constitue un mode d'organisation interentreprises par des échanges de flux ou une mutualisation de besoins.

L'**économie de la fonctionnalité** privilégie l'usage à la possession et tend à vendre des services liés aux produits plutôt que les produits eux-mêmes.

La **consommation responsable** doit conduire l'acheteur, qu'il soit acteur économique (privé ou public) ou citoyen consommateur, à effectuer son choix en prenant en compte les impacts environnementaux à toutes les étapes du cycle de vie du produit (biens ou services).

L'**allongement de la durée d'usage** par le consommateur conduit au recours à la réparation, à la vente ou don d'occasion, ou à l'achat d'occasion dans le cadre du réemploi ou de la réutilisation.

Le **recyclage** vise à utiliser les matières premières issues de déchets. L'apport de la Chimie est essentiel pour la caractérisation de ces nouvelles matières premières, par nature complexes, issues de la biomasse ou des déchets.

Dans son rôle d'animation et de mise en réseau des compétences scientifiques de Génie des Procédés sur le territoire français, la SFGP a organisé son activité autour de groupes thématiques (GTs), qui ont des relations très fortes avec l'Ingénierie Circulaire.

Les **groupes thématiques dits méthodologiques** ont de fait des implications en Ingénierie Circulaire. C'est le cas pour le *GT Ingénierie Avancée des Procédés*, qui intègre les outils informatiques pour la simulation et l'optimisation des procédés, en passant par l'approche systémique pour les éco-parcs. Le *GT Ingénierie des Réacteurs et Intensification* s'intéresse aux procédés de transformation chimique ou biologique, intégrant les phénomènes catalytiques, de la matière quel que soit le type d'intrant. Il développe aussi une méthodologie pour intensifier les procédés. Le *GT Innovation et Procédés* est également concerné par la méthodologie à développer pour intégrer l'économie circulaire dans les schémas de pensée industriels. Le *GT Procédés Séparatifs* travaille en amont et en aval de la (bio)transformation de la matière. Son rôle sera d'autant plus important que les intrants de l'économie circulaire seront plus complexes. Le *GT Sécurité des Procédés* développe des méthodologies qui sont indépendantes du type de procédés, même si l'utilisation de matières recyclées peut apporter de nouvelles problématiques. Le *GT Solides Divisés* est également partie prenante du fait que ce type de matière se retrouve en Ingénierie Circulaire. Le *GT Thermodynamique* a toute sa place pour fournir les données et les modèles thermodynamiques associés aux propriétés des matières premières et des produits transformés. Les propriétés physico-chimiques de tous les matériaux, milieux et produits sont nécessaires pour concevoir, modéliser, extrapoler et optimiser les procédés mis en œuvre en utilisant les concepts de l'Ingénierie Circulaire.

Les **GT applicatifs** sont aussi fortement impliqués dans l'Ingénierie Circulaire. Les *GTs Élaboration des Matériaux Métalliques et Génie de la Polymérisation* s'intéressent au recyclage des matériaux métalliques et polymériques et à leur réutilisation. Le *GT Énergie* s'intéresse à l'optimisation des procédés qu'ils soient issus de l'économie linéaire ou de l'économie circulaire. Le *GT Génie des Procédés Biotechnologiques et Agroalimentaires* est à la fois intéressé par les ressources biosourcées, base de la bioéconomie, par les transformations biologiques de la matière et par le recyclage des matières issues du gaspillage alimentaire. Le *GT Génie du Produit* apporte une méthodologie de la conception des produits avec des propriétés d'usage qui est applicable aux produits issus de l'Ingénierie Circulaire. Le *GT Récupération et Valorisation des Ressources* issues des déchets est au cœur de l'Ingénierie Circulaire et travaille avec les autres GTs en fonction de la problématique. Le *GT Traitement de l'Eau et de l'Air* est aussi central dans l'Ingénierie Circulaire, notamment dans la valorisation matière des effluents gazeux et liquides.

Le dernier GT que l'on peut citer est le *GT Formation*. Cette notion d'Ingénierie Circulaire est à intégrer dans les formations pour préparer les étudiants aux compétences et aux métiers d'avenir liés au développement de l'économie circulaire.

La SFGP a organisé en novembre 2021 des journées Cathala-Letort de réflexion et de prospective sur l'Ingénierie Circulaire (voir Annexe). L'objectif y fut de démontrer l'intérêt de l'ingénierie, et plus particulièrement du Génie des Procédés, dans la problématique de l'économie circulaire. En distinguant l'économie circulaire (approche interdisciplinaire globale et intégrée pour une économie durable) de l'Ingénierie Circulaire (adaptation des procédés, nouvelles filières de production, modélisation systémique...), nous avons mis en évidence que l'Ingénierie Circulaire doit être considérée comme l'une des briques de l'économie circulaire.

1 Les éco-systèmes de l'Ingénierie Circulaire

L'écosystème de l'économie circulaire, intégrant les problématiques liées à l'Ingénierie Circulaire, est maintenant bien structuré en France, sous la houlette notamment du Ministère de la transition écologique et de la cohésion des territoires et du Ministère de l'Économie.

Un certain nombre de programmes et plans du gouvernement ont été lancés et sont encore en cours. De ce point de vue, on peut citer le plan France 2030, sur la réindustrialisation des territoires face aux enjeux du XXIème siècle et du plan France-Nation-Verte sur la Stratégie Bas Carbone et la gestion des ressources dans le contexte du changement climatique et du respect des accords de Paris de réduction de l'empreinte carbone de la France dans toutes ses activités. Ces programmes et plans sont aussi liés à des actions de financement portées par la BPI, et l'ADEME et l'ANR pour les programmes de recherche en complément des actions européennes du programme Horizon Europe et des soutiens des collectivités départementales, régionales et des agglomérations et métropoles. Ces dernières ont mis en place des mesures d'accompagnements spécifiques pour les acteurs publics et privés dans le développement de projets d'économie circulaire. Certaines de ces initiatives sont développées dans le cadre de France 2030.

Du point de vue des outils de prospectives et de réflexions il est important de noter la contribution importante d'associations d'acteurs, tels que l'Institut National de l'Economie Circulaire (INEC) et le l'OREE en relation souvent avec des syndicats professionnels tels que la FEDEREC (Fédération des Entreprises du Recyclage), FNADE (Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement).

La mise en place d'actions repose aussi sur l'implication de différents Eco-Organismes tels que CITEO (emballages ménagers), Ecologic (D3E), Ecosystème (équipements EE ménagers), Ecomaison (Bâtiment), ou encore Valdelia (Bâtiment).

Enfin les enjeux de l'économie circulaire sont aussi portés prioritairement par différents pôles de compétitivité tels que TEAM2, AXELERA, France-Water-Team, Bioeconomy For Change, et Matéralia.

Il est important aussi de souligner l'implication grandissante des sociétés savantes telles que la Société Française de Génie des Procédés, l'Association des Chimistes Ingénieurs et Cadres des Industries Agricoles et Alimentaires, l'Association Française des Matériaux, l'Association Française de Mécanique, le Groupe Français des Polymères et la Société Française de Thermique.

Les grands organismes de recherche tels que le CNRS, INRAE, les EPIC tels que le CEA et l'IFPEN affichent de plus en plus des programmes spécifiques incluant l'aspect d'économie circulaire.

2 Les enjeux académiques

Du point de vue de l'Ingénierie Circulaire et de l'implication des équipes de recherche académique de Génie des Procédés en France, notons l'enquête réalisée par la SFGP en 2021. Cette enquête, non exhaustive, montre que les acteurs académiques du Génie des Procédés ont une activité forte dans le domaine de l'Ingénierie Circulaire avec près de 20 projets en cours recensés sur l'ensemble du territoire.

Au travers des différents projets actuellement portés, on peut noter que :

- Les projets reposent sur une très forte pluridisciplinarité avec une approche transverse des activités.
- Dans la majorité de projets il existe un lien fort avec la notion de territoire et d'écosystèmes.
- Les outils et des sources de financement des projets sont variés (ANR, ADEME, Régions, Industries, BPI, Organismes, Europe) avec une association presque systématique à un ou plusieurs partenaires industriels.
- L'ensemble des piliers de l'EC est concerné, avec des actions plus marquées sur :

- le recyclage (plastiques, notamment par voie pyrolytique, récupération des métaux dans les stations d'épuration, recyclage de l'eau traitée pour l'irrigation ou pour la production de microalgues, déchets industriels, textiles) ;
- l'approvisionnement durable (valorisation de la biomasse, valorisation des déchets agro-industriels pour la production de PHA pour la conception d'emballage et la valorisation des restes de l'industrie de transformation des légumes en protéines fonctionnelles à haute valeur, valorisation du Fe et des métaux critiques dans les résidus de bauxite, eaux usées) ;
- l'écologie industrielle et territoires et l'approche systémique (valorisation du CO₂ pour la production de microalgues, valorisation d'effluents gazeux d'élevages agricoles) ;
- l'acceptabilité sociale (nouveau rapport entre production, distribution et consommation pour aller vers des pratiques plus responsables) ;
- et sur l'écoconception (couplage ACV-Modélisation avec des exemples variés : parc photovoltaïque connecté au réseau, procédé de concentration/séchage du lait, procédé de production de biodiesel à partir d'huiles végétales).

Les aspects formations universitaires spécifiques et ciblées d'Ingénierie Circulaire, initiales ou continues, sont en développement croissant et dans toutes les formations en place (BUT, Licences, Licences Professionnelles, Masters, Ecoles d'Ingénieurs), les outils du Génie des Procédés au service de l'Ingénierie Circulaire restent au cœur de l'enseignement dispensé. On peut citer quelques exemples comme la création d'un master Européen (BIOCEB, Biological and Chemical Engineering for a sustainable Bioeconomy) avec l'implication d'enseignants-chercheurs d'AgroParisTech et de l'université de Reims-Champagne-Ardennes, ainsi qu'à Polytech Marseille du diplôme de Mastère Spécialisé en Économie Circulaire et Organisation Durable (ECOD) qui permet de compléter, en une année, en lien fort avec le monde socio-économique les diplômes classiques d'ingénieurs ou de masters. Des formations du type Masteres Spécialisés, tels que PRINEC (Procédés et Ressources pour l'Ingénierie de l'Économie Circulaire), porté par l'IMT Albi et Ales, et "Ingénierie de l'Économie Circulaire Appliquée aux Matériaux Durables", proposé par l'IMT Lille, complètent l'offre de formation.

3 Les enjeux industriels

La prise de conscience que les activités humaines doivent être durables est maintenant très largement partagée et comprise, à la fois en raison des efforts de formation et d'information mais aussi car les premiers effets du changement climatique sont maintenant bien perceptibles à tous. Dans nos sociétés qui n'ont cessé de prendre le virage d'une organisation économique et sociale fondée sur des activités industrielles et tertiaires fortes, l'adaptation à cette exigence de durabilité passe par la création d'une économie circulaire soutenable et des évolutions profondes. Toutes les activités de transformation de la matière, avec leurs procédés et systèmes industriels consommateurs d'énergie et de matière sont concernées au premier plan : il n'y aura pas d'économie circulaire durable si les activités industrielles et d'approvisionnement ne s'organisent et ne se transforment pas à l'unisson dans cette direction.

Mais pour passer de l'idée à la réalisation, des études sont nécessaires afin d'assurer la cohérence des choix d'organisation et d'investissement et une certaine pérennité des activités projetées. Ces études doivent déboucher sur des propositions justifiées puis des actions concrètes de réorganisation des flux et des méthodes de transformation de la matière.

Une véritable écoconception des procédés doit pouvoir ainsi être proposée et justifiée. Elle décrit les circuits de la matière, leur réalisation technique, la manière de créer de la valeur économique, sociale et environnementale au travers de nouvelles organisations des procédés, la plupart étant encore à concevoir ou développer ou à industrialiser et généraliser à grande échelle.

Les choix qui sont à faire doivent pouvoir être compris et expliqués aux multiples acteurs impliqués par les changements à engager. Une véritable ingénierie qui se développe des études techniques aux justifications économiques, sociales et environnementales est nécessaire pour soutenir ces décisions puis réalisations.

Les enjeux industriels sont donc colossaux et absolument critiques. Quelles en sont les facettes scientifiques ou techniques principales ?

4 Les grands domaines de l'Ingénierie Circulaire

a - Eco-conception des procédés

L'écoconception est une démarche visant à limiter et réduire les impacts environnementaux, en tenant compte des équilibres économiques et sociaux des procédés, à chaque stade du cycle de vie. Elle est identifiée comme l'un des leviers pour limiter les impacts environnementaux des procédés.

Les normes ISO/TR 14062 (2002) et NF X30-264 (2013), destinées aux concepteurs et développeurs de produits, précisent la méthodologie de la démarche d'éco-conception, au travers de cinq spécificités : les approches cycle de vie, multicritères, systémique, multi-acteurs et le principe de fonctionnalité.

Bellini et Janin (2020), dans leur article des techniques de l'ingénieur « Éco-conception : état de l'art des outils disponibles », ont identifié les fonctions principales pour les outils d'éco-conception: l'évaluation, la préconisation, l'accompagnement et la communication.

Selon Sargent (1983), le Process Systems Engineering (PSE ou Procédés et Systèmes Industriels en français) concerne « tout ce qui se rapporte au développement de techniques systématiques pour la modélisation des procédés, leur conception et le contrôle ». Pour résoudre des problèmes d'ingénierie des procédés dans des domaines très différents (industrie pétrolière, aéronautique, agroalimentaire, manufacturière...), les méthodes et outils numériques du PSE sont nécessaires. Cette vision et les outils développés ont évolué au cours du temps, en suivant les besoins de la société et la transformation des industries. Ainsi, durant les dernières décennies, les demandes pour obtenir des produits polyvalents, compétitifs, soutenables et à coût bas nécessitent de concevoir des procédés de production en adéquation avec ces objectifs : flexibles, propres et « intelligents » (« smart ») (Grossmann, 2004). Ces évolutions amènent les champs du PSE à s'élargir sur de nombreux aspects liés à la modélisation (Bhosekar et Lerapetritou, 2018) ; à l'analyse des données (Ning et You, 2017) ; à l'optimisation à grande échelle (Lainez et al., 2017) ; à l'écologie industrielle (Boix et al., 2015) ; à l'apprentissage automatique (Lee et al., 2018) et également à s'associer à d'autres compétences techniques. Dans une récente revue de la littérature, Pistikopoulos et al. (2021) reviennent sur les défis actuels et les solutions que la communauté PSE peut apporter. Ils montrent ainsi la vision multi-échelle (Gani et al., 2020) et systémique des nouveaux outils PSE et les contributions possibles pouvant faire face aux défis environnementaux par le biais d'un renouveau industriel dont la société a besoin.

Les techniques d'optimisation dédiées à la conception des procédés ont dû évoluer pour prendre en compte des modèles toujours plus complexes en termes de taille (nombre de variables, contraintes) et de formulation afin de représenter l'entièreté des systèmes étudiés. L'approche systémique que nous développons consiste à considérer, selon différentes échelles, les systèmes comme des ensembles d'interactions via une formulation globale et holistique (Le Moigne, 1994, 2006), contrairement aux approches traditionnelles qui découpaient le système en parties sans considérer les interactions et les activités qui l'animent. A travers des approches de modélisation macroscopique, l'idée est de concevoir les interactions optimales entre les composants du système grâce à des méthodes d'optimisation, la plupart du temps multicritères.

La production et la gestion décentralisées des ressources locales favorisent leur valorisation et la réduction des impacts environnementaux. Plus largement, cette thématique pose la question de l'interopérabilité de systèmes avec comme objectif la création de nouvelles activités économiques territoriales par le biais des circuits courts, du réemploi et du recyclage.

b - Approvisionnement durable des ressources, recyclage

Recyclage ou réemploi de matières et déchets en fonction de leurs empreintes carbone et énergétique

Le Tableau 1, réalisé notamment avec les données du rapport de l'ADEME et de la FEDEREC en 2017¹ sur l'évaluation environnementale du recyclage en France (référence en bas de page), montre pour sept différents déchets les économies d'émission de CO₂ et de consommation énergétique réalisées par leur recyclage.

	Émissions de CO ₂ avec recyclage	Economie émission tonneCO ₂ /tonne collectée	Energie avec recyclage	Economie Energie MWh/tonne collectée	Consommation annuelle France
Fer	2,3 fois moins	1,3 tonneCO ₂ /tonne 16,7 Mtonnes CO ₂ /an	1,7 fois moins	2,5 MWh/tonne 32,0 GWh/an	12,8 M tonnes
PEHD	9 fois moins	2,8 tonneCO ₂ /tonne 5,0 Mtonnes CO ₂ /an	9 fois moins	13,4 MWh/tonne 24,1 GWh/an	1,8 M tonnes
Aluminium	14 fois moins	7,3 tonneCO ₂ /tonne 7,3 Mtonnes CO ₂ /an	17 fois moins	41,0 MWh/tonne 41,0 GWh/an	1,0 M tonnes
Textiles	50 fois moins	5,7 tonneCO ₂ /tonne 5,0 Mtonnes CO ₂ /an	100 fois moins	26,0 MWh/tonne 18,2 GWh/an	0,7 M tonnes
Verre	1,3 fois moins	0,6 tonneCO ₂ /tonne 1,9 Mtonnes CO ₂ /an	1,4 fois moins	1,6 MWh/tonne 5,0 GWh/an	3,1 M tonnes
Papier	Equivalent	0,05 tonneCO ₂ /tonne 0,55 Mtonnes CO ₂ /an	3,4 fois moins	5,1 MWh/tonne 55 GWh/an	11 M tonnes
Carton	1,7 fois plus	-0,3 tonneCO ₂ /tonne -0,9 Mtonnes CO ₂ /an	4,4 fois moins	8,8 MWh/tonne 26,4 GWh/an	3 M tonnes

N. ROCHE (2022), d'après ADEME-FEDEREC 2017

Tableau 1 : Impact du recyclage sur les émissions de CO₂ et de consommation énergétique de certains matériaux (par N. Roche, d'après ADEME-FEDEREC 2017)

En premier lieu, nous voyons bien toute la nécessité de réfléchir à la transformation du modèle actuel de consommation et d'utilisation des vêtements. De ce point de vue les grands marchés de fripes développés en Afrique, et le développement très rapide d'application des reventes de vêtements, type Vinted®, montrent tout l'intérêt du réemploi et d'un exemple à suivre et à adapter. Sur ces aspects de réemploi direct, les apports des approches Génie des Procédés restent néanmoins limités.

On voit aussi tout l'intérêt du recyclage des matériaux tels que l'aluminium, le PEHD et dans une moindre mesure le fer (notamment pour son tonnage). Ceci permet de réduire les émissions de CO₂ et les consommations énergétiques sur toutes les phases d'extraction, de transport, de traitements et de séparation des minerais. Le recyclage doit aussi concerner l'ensemble des produits chimiques (voir Encart 1 : Recyclage du brome par Séché Environnement). Cependant d'autres problématiques ne doivent pas être négligées comme la pollution générée dans le process de régénération de la matière, par exemple la dispersion en très grande quantité de micro-plastiques lors du recyclage mécanique du PEHD.

¹ https://presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2017/05/FEDEREC_ACV-du-Recyclage-en-France-VF.pdf

Pour ce qui concerne le verre, étant donné que l'impact principal est surtout dû au procédé de fusion du verre (que l'on retrouve dans son recyclage), il est important de développer et mettre en place les filières de réemploi et consignes comme cela est toujours fait dans de nombreux pays, par exemple en Allemagne. C'est une véritable mutation du modèle production/distribution/consommation qui ne peut être vue que comme une substitution et nécessite au contraire une totale remise en cause des systèmes donc d'une nouvelle Ingénierie Circulaire.

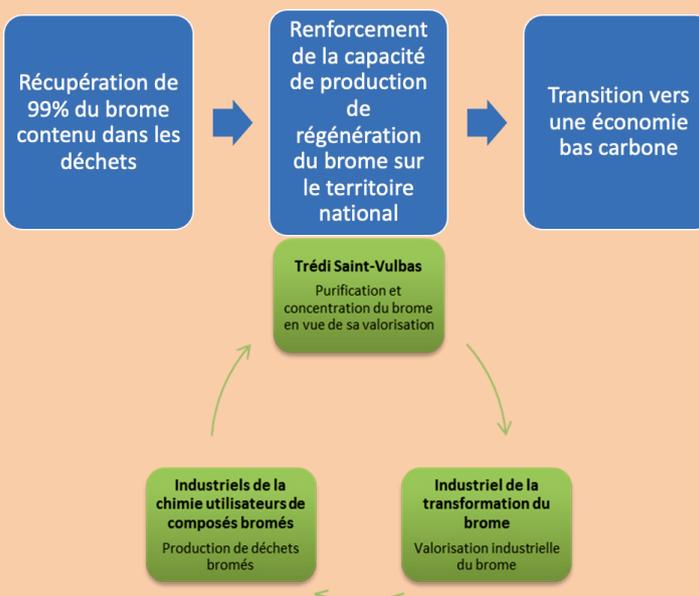
Encart 1 - Projet industriel

Du déchet dangereux à la ressource rare : l'exemple de la régénération du brome sur le site Séché Environnement de Saint-Vulbas

Le brome et ses dérivés, comme l'acide bromhydrique, sont utilisés pour fabriquer une grande variété de produits chimiques ; ils sont produits à partir de solutions riches en bromures, extraites des ressources naturelles (eau de mer, nappes souterraines) avec des impacts environnementaux et énergétiques très importants. C'est dans ce contexte que Séché Environnement a développé une technologie basée sur l'utilisation de déchets riches en bromure provenant des secteurs pharmaceutiques et chimiques, se substituant au prélèvement des ressources naturelles. L'opération consiste à détruire la fraction organique des déchets pour produire une matière première propre à la synthèse de brome Br₂. Ce développement vise à créer un cycle de vie de l'atome de brome dans un souci de préservation des ressources. Unique au monde, ce procédé, développé sur le site de Séché Environnement à Saint-Vulbas (01) repose sur la purification thermique du brome contenu dans des déchets industriels, pollués par des substances organiques, via un four statique. Le caractère innovant du procédé réside dans la maîtrise du transport de sel de bromures sous une forme particulière solide. Ce point constitue une pièce maîtresse dans la première étape de traitement de fumée du four, qui permet ainsi de récupérer plus de 99% du brome contenu dans les déchets, sous forme de saumures exploitables dans la synthèse de brome.



La régénération du brome, une activité au cœur de l'économie circulaire



Le cas du papier et des cartons est aussi symptomatique, car c'est globalement la filière de tri et de recyclage la plus ancienne, avec notamment une très bonne acceptabilité sociétale du papier recyclé. En revanche, on constate que ces filières de recyclage peuvent avoir des effets négatifs sur les économies d'émission de CO₂ pour le recyclage du carton. Cela est dû essentiellement à la part importante des procédés de transformation, de recyclage et de traitement des effluents et des déchets et aussi parce que la ressource naturelle initiale (le bois) est une ressource biogénique renouvelable, non intégrée dans le bilan carbone de la filière. Cela pose aussi la question sur les autres voies de valorisation, thermique notamment, pour la production de chaleur à partir de ces déchets.

Tous ces chiffres sont bien sûrs aussi à comparer aux niveaux d'impacts carbone des autres activités anthropiques et notamment le transport, l'énergie, l'industrie et l'habitat et montrent la nécessité de mettre en place systématiquement une réflexion globale et territoriale incluant les sept piliers de l'économie circulaire (Approvisionnement durable, Écoconception, Écologie industrielle et territoriale, Économie de la fonctionnalité, Consommation responsable, Allongement de la durée d'usage, recyclage) et toujours dans une approche holistique absolument interdisciplinaire, multi-échelles et en y associant tous les acteurs de la société.

Criticité de la ressource minérale

Le développement des énergies renouvelables, l'électrification de la mobilité, l'explosion des objets connectés pour ne citer que quelques exemples, entraînent une consommation toujours plus importante de ressources minérales. A titre d'exemples, la production d'1MW d'électricité nécessite 3 à 7 fois plus de métaux quand elle est produite par une éolienne ou un panneau photovoltaïque par rapport à une centrale à charbon. La composition et la quantité de la ressource minérale mobilisée pour la fabrication de voitures thermiques et électriques et pour différents moyens de production d'énergie sont données dans le rapport « The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions » de l'IEA (IEA, 2021). Quant à la fabrication d'un smartphone, ce sont 100 à 200 kg de matières premières qui sont mobilisés (Lhotellier et al. 2018).

Dans ce contexte, la question de la finitude des ressources naturelles du système Terre se pose. A l'aube de l'anthropocène, caractérisé par le poids gigantesque de notre humanité (en 2020, la masse des objets anthropiques a dépassé le poids du vivant), l'exploitation sans limite de la ressource minérale a des conséquences inquiétantes qui méritent une attention particulière. L'appauvrissement des ressources minérales primaires et l'augmentation des quantités d'énergie nécessaires pour exploiter des gisements de plus en plus dilués (la teneur en cuivre dans les gisements exploités est passée de 15% à 1% en 150 ans) rendent ces ressources critiques et pourraient mettre en difficulté un certain nombre de technologies déterminantes pour la transition environnementale. Face à ce risque, certains pays ou institutions ont défini certaines ressources minérales comme étant critiques. La liste de métaux critiques définie par l'Union Européenne se voit s'enrichir de plusieurs métaux/matériaux tous les 3 ans en se basant sur leur importance économique et leur risque d'approvisionnement (Blengini et al. 2020). Ce phénomène risque de s'amplifier dans le futur avec les nombreuses incertitudes qui pèsent sur le contexte actuel (environnemental, sanitaire, géopolitique, etc.).

Face à cette menace, l'économie circulaire semble être un levier important pour (i) réduire la pression environnementale exercée ces dernières années sur ces ressources minérales et (ii) réduire les risques d'approvisionnement liés en partie au monopole de la production détenu par seulement quelques pays. Pour être durable, cette économie doit s'accompagner par une consommation plus sobre des ressources (Grosse, 2014). Face à ce nouveau paradigme, le Génie des Procédés a beaucoup à apporter (Figure 1).

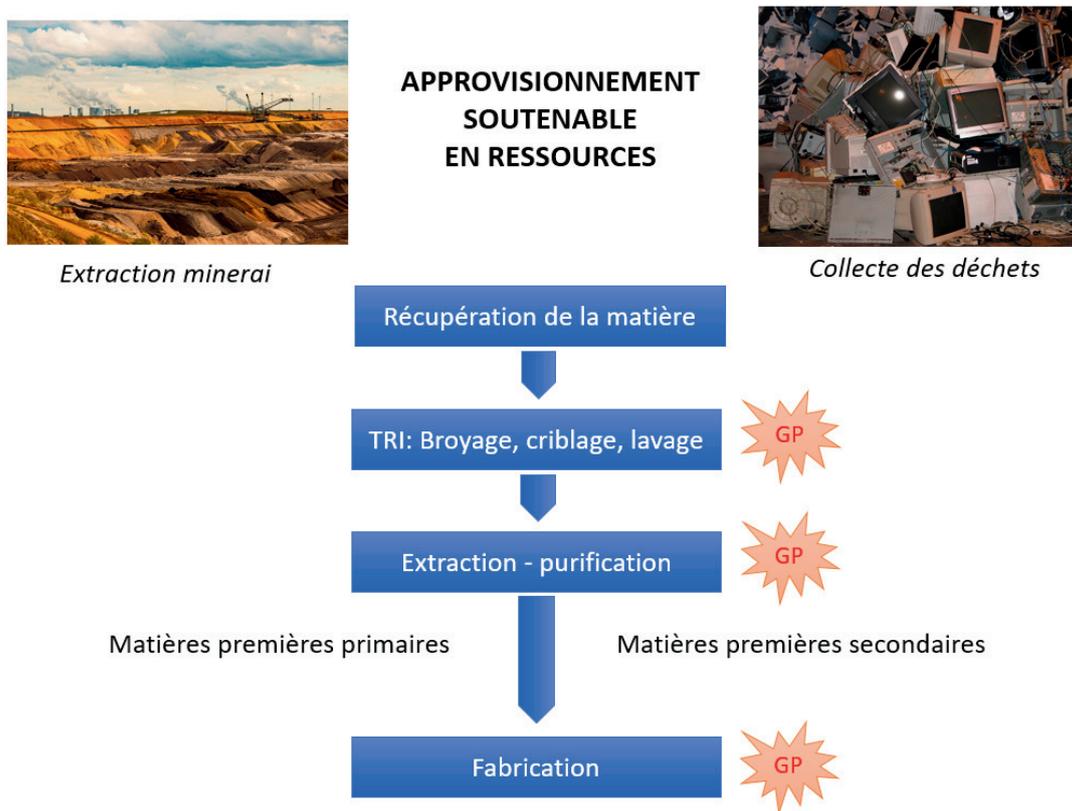


Figure 1 : Apport du Génie des Procédés à l’approvisionnement en ressources

c - Écologie industrielle et territoriale

La conception des systèmes complexes pour le développement d’une économie circulaire implique une synergie entre les territoires et leurs parties prenantes en intégrant l’économie mais également des perspectives environnementales et sociétales importantes. C’est dans cette optique que s’inscrivent les activités de recherche du département Procédés et Systèmes Industriels du Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse qui ont pour but de développer des méthodes robustes pour la conception optimale de parcs éco-industriels en vue de leur mise en œuvre pratique. Outre les aspects environnementaux, il est fondamental que les bénéfices générés par chaque industrie au sein du parc soient supérieurs à ceux qu’elle aurait générés, pour une même production, en fonctionnant seule. La finalité est de développer et de mettre en œuvre des outils d’optimisation et d’aide à la décision permettant d’assurer l’attractivité de ces systèmes ainsi que leur pérennité. De nouveaux modes de collaboration doivent ainsi être développés au sein de mêmes territoires afin d’assurer la circularité des matières (eau, matières premières) et des énergies (renouvelables ou non). A titre d’exemple de travaux de recherche, le projet ANR GREENSCOPE (<https://anr.fr/Projet-ANR-16-CE10-0001> porté par le Laboratoire de Génie Chimique, Toulouse) a visé à développer une nouvelle organisation des industries, de leur territoire d’implantation et de leur intégration dans ce territoire. Une des solutions disponibles réside dans la mise en œuvre des concepts de l’écologie industrielle et territoriale. Elle permet notamment de répondre à l’enjeu de transition écologique par une approche systémique d’optimisation de l’interopérabilité (flux d’échanges d’eau, d’énergie ou de déchets) des différents acteurs d’un même territoire (industries, administrations, municipalité...).

Cette approche a pour but de proposer des solutions favorisant les échanges inter-entreprises dans une dynamique collective tout en optimisant les gains propres à chaque participant. Ceci favorise la flexibilité et la compétitivité des entreprises à travers la notion d'équilibre dans un contexte de développement durable. Le but est alors de redynamiser le territoire par la maîtrise de la consommation des ressources naturelles en visant la décarbonation des sites industriels à l'échelle territoriale. Un exemple est donné dans l'encart 2 : les microalgues appliquées à l'économie circulaire du ciment.

En 2016, la France s'est dotée d'une stratégie nationale bas-carbone (SNBC) qui l'engage dans la voie de la transition écologique et solidaire. Cette SNBC a été révisée en 2019 et plus récemment fin 2023. Ici sont présentés les objectifs de 2016. Elle affirme deux ambitions :

1. Atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 ;
2. Réduire l'empreinte carbone de la consommation des Français.

La SNBC encourage en particulier l'usage de la biomasse pour substituer des produits biosourcés aux produits fossiles ou pétro-sourcés par des produits biosourcés.

Encart 2 - Projet ADEME : CIMENTALGUE

Les microalgues appliquées à l'économie circulaire du ciment

La société AlgoSource Technologies fait partie du groupe AlgoSource, producteur et transformateur de microalgues depuis 1993 en Loire-Atlantique avec pour slogan « la santé par les microalgues ». Le groupe AlgoSource commercialise des produits et des ingrédients destinés aux marchés de la Nutraceutique et de la Cosmétique en s'appuyant sur 4 piliers : culture durable, algoraffinage durable, recherche, essais cliniques pour valider nos produits.

Via sa filiale AlgoSource Technologies, bureau d'études ingénierie et recherche, elle assure pour des clients extérieurs principalement des missions d'élaboration et de conduite de projets, de conception et de dimensionnement de démonstrateurs et d'unités de production de microalgues. Elle s'est notamment spécialisée dans le développement de procédés de recyclage de CO₂ d'origine industrielle (biofixation du CO₂) et de chaleur fatale par la culture de microalgues. Le traitement d'eaux par la culture de microalgues est également étudié.

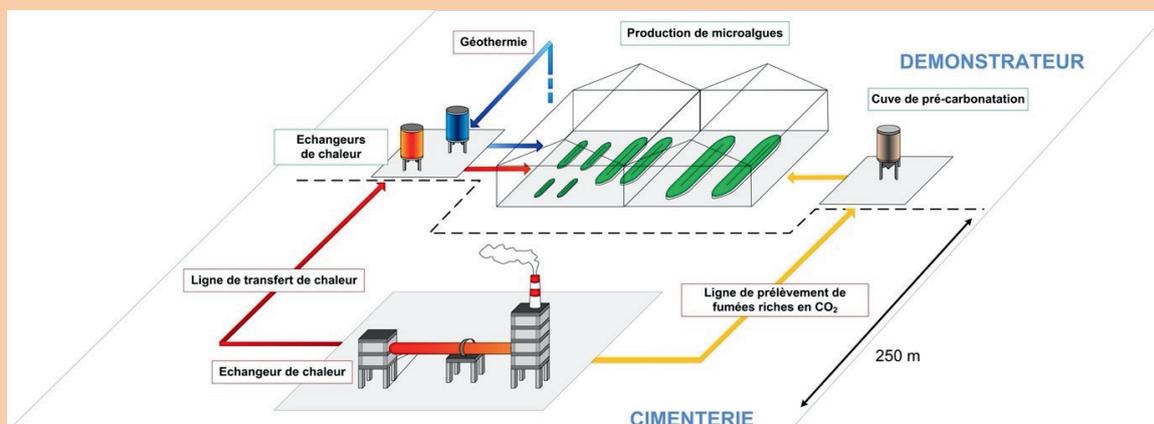


Schéma général

Pour se développer, les microalgues ont besoin de CO₂, d'eau, de lumière et de sels minéraux. Par la photosynthèse, elles produisent diverses molécules organiques d'intérêts : protéines, polysaccharides, lipides, pigments anti-oxydants, vitamines, etc... valorisables sous forme de produits chimiques au sens large (entre autres, biomatériaux) ou énergétiques. En conditions contrôlées par l'homme, elles sont cultivées dans des bassins ou dans des photobioréacteurs en général de forme tubulaire. Les microalgues se développent entre 5 et 10 fois plus rapidement que les plantes terrestres.

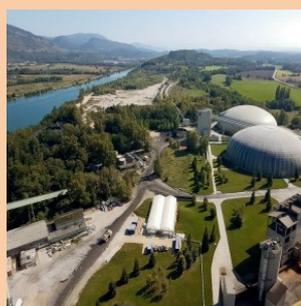
Des expériences « pilote » ont été conduites entre 2011 et 2015 en cimenterie afin de démontrer la biocompatibilité entre plusieurs souches de microalgues et la fumée produite par le procédé et riche en CO₂. Fort des résultats obtenus, un projet de design, conception, dimensionnement, construction et exploitation d'un démonstrateur a été développé depuis 2019 au sein d'une cimenterie près de Lyon, avec le soutien de l'ADEME. Ce projet appelé « CIMENTALGUE » et coordonné par le groupe cimentier VICAT inclut également comme partenaire le groupe Total, Nantes Université (GEPEA-UMR CNRS 6144 et GeM UMR CNRS 6183), la société AlgoSource Technologies. Outre le soutien de l'ADEME, le projet est supporté par les régions Pays de la Loire et Auvergne Rhône Alpes et est labellisé par le pôle de compétitivité Mer Bretagne Atlantique. Le démonstrateur est composé d'une serre de 800 m² abritant 6 bassins (dont un bassin clos), un photobioréacteur tubulaire et un système de culture intensifiée AlgoFilm développé par le GEPEA. 2 lignes de transfert de 250 m de long chacune permettent d'amener au démonstrateur du CO₂ produit par l'usine et de la chaleur fatale (afin de maintenir à température optimale les systèmes de culture).

Le programme d'exploitation (2023 - 2024) du démonstrateur doit permettre de valider et d'optimiser le concept de recyclage de CO₂ par la culture de microalgues à une échelle représentative. Il est prévu de tester 2 souches très différentes : une souche à visée Food/Feed et une souche à visée énergétique.

Le recyclage de CO₂ fait partie de l'économie circulaire du carbone où ce dernier, déchet d'une activité industrielle devient l'intrant d'une autre activité. Pour l'industriel, il s'agit de participer à l'économie circulaire du carbone et de valoriser plusieurs de ses effluents. Pour le producteur de microalgues, il s'agit de réduire ses coûts de production et son impact environnemental tout en augmentant le rendement de production de biomasse.



Vue générale du démonstrateur



Bassin de 188 m³

Par ailleurs, les biodéchets (déchets alimentaires et autres déchets naturels biodégradables), qui représentent un tiers des poubelles résiduelles en France, constituent un gisement non négligeable à valoriser. La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015 prévoit que tous les particuliers disposent d'une solution pratique de tri à la source et de valorisation de leurs biodéchets avant 2025 et a fixé les objectifs suivants :

1. Réduire de 50 % la quantité de déchets non dangereux, non inertes, mis en décharge à l'horizon 2025 par rapport à 2010 ;

2. Valoriser 55 % des déchets non dangereux, non inertes, notamment organiques, en 2020 et 65 % en 2025, via notamment la généralisation du tri à la source des biodéchets ;
3. Découpler progressivement la croissance économique et la consommation de matières premières, amorcer une transition vers une économie circulaire (définie dans la loi) ;
4. Valoriser énergétiquement les déchets qui ne peuvent être recyclés en l'état des techniques disponibles et qui résultent d'une collecte séparée ou d'une opération de tri réalisée dans une installation prévue à cet effet.

De nombreuses technologies biologiques, physico-chimiques ou thermiques existent pour valoriser les matières résiduelles organiques : compostage, méthanisation, incinération, gazéification, pyrolyse, etc. (Nayak et Bushan, 2019). Il est par ailleurs possible de coupler plusieurs technologies : compostage/méthanisation, pyrolyse/gazéification, etc.

Au moment de choisir et de mettre en œuvre une technologie sur un territoire dans une logique d'économie circulaire, plusieurs tensions apparaissent.

Tout d'abord, contrairement aux procédés de production où la fonction principale du procédé est la mise sur le marché d'un produit ou d'une énergie répondant à un cahier des charges précis, les procédés de valorisation des biodéchets sont conçus et dimensionnés pour des matières entrantes dont la quantité et la qualité ne sont pas maîtrisées. Il est donc nécessaire que le dimensionnement des procédés prenne en compte la variabilité des propriétés de la matière entrante qui est très dépendante des spécificités du territoire (types d'activité économique, types de logement, types de profil socio-démographique, etc.). Cela implique de développer des procédés flexibles ou adaptatifs.

Ensuite, les procédés de valorisation des biodéchets d'origine biologique, agricole ou anthropique sont caractérisés par une matière entrante dispersée sur un territoire. Or, d'une part, les propriétés qualitatives et quantitatives des biodéchets sont très dépendantes des activités locales (zones commerciale, résidentielle, industrielle, etc.) et, d'autre part, la collecte et le transport des biodéchets représentent un coût pour la collectivité. La question se pose donc de savoir s'il vaut mieux développer des micro-procédés répartis sur le territoire afin de minimiser les coûts (économiques et environnementaux) liés à la collecte et au transport quitte à générer des coproduits à faible valeur ajoutée (biogaz pauvre, compost non réglementaire, etc.), plutôt que de développer des procédés industriels centralisés conduisant à des coproduits à haute valeur ajoutée (méthane injectable ou GNV, compost normé, etc.) quitte à assumer les coûts de collecte et de transport.

Enfin, et toujours contrairement aux procédés de production où le produit principal (correspondant à la fonction principale du procédé) est aussi le produit à valeur ajoutée, les procédés de valorisation des biodéchets ont généralement une fonction principale qui conduit à une valeur ajoutée moins importante. Par exemple, en considérant la méthanisation pour la valorisation de biodéchets, si le marché du traitement des déchets est découplé du marché de l'énergie, on pourrait avoir un revenu lié au traitement de biodéchets inférieur au revenu de production de méthane. Il en résulte qu'il est primordial de se préoccuper du devenir des coproduits des procédés de valorisation et, dans une logique d'économie circulaire, de vérifier l'existence de marchés locaux pour ces produits ou de développer localement une filière de valorisation de ces coproduits.

Face à ces trois tensions liées à la mise en œuvre de procédés de valorisation des biodéchets sur un territoire dans une logique d'économie circulaire, plusieurs défis concernent le Génie des Procédés :

1. Développer des procédés flexibles ou adaptatifs capables de prendre en compte la variabilité quantitative et qualitative des biodéchets générés sur un territoire ;
2. Développer des procédés de valorisation (méthanisation, compostage, gazéification, etc.) de tailles variables afin de pouvoir répondre à des demandes de valorisation centralisée (échelle industrielle) ou décentralisée (micro-procédés), voire de taille intermédiaire ;
3. Développer des procédés de valorisation des coproduits (biogaz, digestats, composts, etc.) adaptés aux besoins locaux en évitant tout effet rebond ;
4. Prendre en considération les citoyens comme acteurs à part entière de la filière de valorisation dès le début de la conception des procédés (écoconception) car la performance et le succès des technologies développées dépendent de l'appropriation du scénario retenu pour la valorisation des biodéchets par le citoyen ;
5. Repenser le modèle économique de la filière de valorisation des biodéchets sur un territoire et les relations clients-fournisseurs de cette filière.

Dans cette logique, le projet IDEES « Intégration des Dimensions Environnementales, Économiques et Sociales dans une logique d'économie circulaire », financé par le région Hauts-de-France et impliquant l'université de technologie de Compiègne (UTC), l'agglomération de la région de Compiègne (ARC) et le syndicat mixte du département de l'Oise (SMDO), s'attaque à une partie des défis mentionnés ci-dessus (voir Encart 3 : Projet IDEES : Intégration des Dimensions Environnementales, Économiques et Sociales dans une logique d'économie circulaire).

Encart 3 - Projet IDEES

Intégration des Dimensions Environnementales, Économiques et Sociales dans une logique d'économie circulaire (2023-2025)

La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) de 2015 prévoit que tous les particuliers disposent d'une solution pratique de tri à la source et de valorisation de leurs biodéchets avant 2025. Plusieurs scénarios de gestion de la matière résiduelle organique peuvent être envisagés. Nous pouvons les catégoriser en deux grands méta-scénarios : un méta-scénario décentralisé disposant d'un tri à la source sans collecte et de micro-procédés de valorisation individuels ou de quartier, et un méta-scénario centralisé disposant d'un tri à la source avec collecte et de procédés de valorisation industrielle.

Le présent projet (présenté par Olivier Schoefs et Frédéric Huet, Université de Technologie de Compiègne) vise donc à développer un outil d'aide à la décision pour le choix de scénarios de gestion de la matière organique sur un territoire, basé sur une approche systémique et prenant en considération les impacts environnementaux, économiques et sociaux dans une logique d'économie circulaire.

Pour ce faire, il s'agit d'adapter les méthodologies d'évaluations environnementale, économique et sociale au contexte de la gestion des matières résiduelles organiques, de tester ces nouvelles méthodologies sur des cas d'études et d'intégrer les résultats au sein d'un outil d'aide à la décision.

Le projet comprend 4 phases :

- Phase 1 : Recueil et analyse des données existantes
- Phase 2 : Réalisation des enquêtes et des campagnes d'échantillonnage
- Phase 3 : Réalisation des études d'évaluation environnementale, économique et sociale
- Phase 4 : Intégration des résultats au sein d'un outil d'aide à la décision

Ce projet vise donc à mettre à disposition un outil d'aide à la décision pour le choix d'un scénario durable, c'est-à-dire vivable, viable et équitable, pour la gestion des matières résiduelles organiques sur un territoire. Ce projet représente une contribution significative à la transition vers l'économie circulaire dans le secteur de la valorisation des matières résiduelles par le développement d'un outil méthodologique pouvant être appliqué à d'autres secteurs d'activités comme le recyclage des matières plastiques, la production de matières et énergies biosourcées, etc.

d - Allongement de la durée d'usage

L'exemple des batteries de la mobilité électrique

L'ADEME définit l'allongement de la durée d'usage comme le « renouvellement des équipements via le réemploi, la réutilisation, la réparation et [qui] diminue de fait la quantité de biens produits et contribue à la préservation des ressources et à la réduction des déchets ». A ce titre, l'utilisation de batteries pour la mobilité électrique en seconde vie permet de prolonger leur durée de vie sans recourir à des procédés coûteux et complexes tels que le recyclage. La question qui s'ouvre est celle de la capacité à améliorer la performance originelle (« up-grader ») des produits manufacturés et notamment des véhicules électriques par l'installation de batteries plus performantes, de nouvelles technologies et de mises à jour logicielles.

En réponse à l'urgence climatique, l'Europe a acté la fin de vente des véhicules thermiques pour 2035, la solution principale de remplacement étant le véhicule électrique. La forte demande en batteries électriques associée à ce changement de cap a notamment permis l'implantation de 3 gigafactories de batteries électriques en France. La forte production de batteries de véhicules électriques attendue à partir de 2023 est associée à une réglementation spécifique. La Directive européenne 2006/66/CE et le règlement à venir qui l'abrogera² ainsi que l'article R543-130 du code de l'environnement en France contraignent, en effet, les constructeurs de véhicules électriques à assurer une collecte et un recyclage de ces batteries, permettant ainsi de sécuriser la circularité de la filière. Ce règlement propose que la priorité soit donnée à une utilisation des batteries industrielles et de véhicules électriques en seconde vie pour un usage stationnaire et des règles doivent être définies afin d'assurer la sécurité des utilisateurs via une évaluation de l'état de santé des batteries. Le règlement propose également qu'un passeport batterie soit fourni afin d'assurer une transparence tout le long de la chaîne de valeur et de fournir notamment l'état de santé des batteries.

Les batteries Li-ion étant retirées des véhicules électriques à 80 % de leur capacité initiale, elles peuvent alors être utilisées à d'autres fins, en tant que batterie de seconde vie en stockage stationnaire jusqu'à 50 % à 60 % de leur capacité initiale. Comme l'indique le règlement, l'un des enjeux liés à l'utilisation de batteries de seconde vie est la maîtrise des risques spécifiques à la réutilisation (sous-cyclage) de batteries sans modification fonctionnelle de celles-ci. Ainsi, le développement de la filière doit être accompagné d'une évaluation des risques en lien avec l'extraction de la batterie, le Battery Management System (BMS) et l'évaluation de l'état de santé de la batterie, son stockage, son transport et ses utilisations de seconde vie.

² Proposition de règlement du parlement européen et du conseil relatif aux batteries et aux déchets de batteries, abrogeant la directive 2006/66/CE et modifiant le règlement (UE) 2019/1020. 2020/0353 (COD) du 10 décembre 2020.

L'une des problématiques particulières liée à la seconde vie est l'évaluation de l'état de santé de la batterie lors de son extraction du véhicule. Cette information-là, donnée par le BMS, n'est pas toujours accessible car contrôlée par la propriété commerciale des constructeurs automobiles. Une connaissance des situations dangereuses et des fonctions de sécurité dans lesquelles le BMS est impliqué est alors nécessaire et des protocoles de tests doivent être développés afin d'évaluer la qualité des modules/packs batteries issues des véhicules électriques hors d'usage afin de garantir une utilisation sûre.

Le projet **SafeLiBatt**³ (*Safety concerns and opportunities related to advanced materials and new technologies in energy production and storage*) entend donner des réponses à cet enjeu en produisant une base scientifique pour le développement sûr et durable de batteries de seconde vie.

Coordonné par Boku (Universität für Bodenkultur, Autriche), le consortium de SafeLiBatt inclut l'Ineris (Institut national de l'environnement industriel et des risques, France), le BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Allemagne), Brimatech (Autriche) et l'Institute of technology assessment (Autriche). Le projet est structuré de manière à évaluer les risques en cas de défaillance et d'emballage thermique des batteries de 1ère et 2nde vies, les impacts environnementaux et sociaux-économiques, de proposer des mesures de gestion intégrée des risques et doit notamment permettre de développer des protocoles de test sur les cellules de seconde vie.

e - Décarbonation et CO2

La stratégie nationale bas carbone (SNBC) fixe des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre en France à court/moyen terme. Elle poursuit deux ambitions : atteindre la neutralité carbone, c'est-à-dire des émissions nettes nulles d'ici 2050 (objectif introduit par le plan climat de juillet 2017 et inscrit dans la loi), et réduire l'empreinte carbone des Français. Le SGPE (Secrétariat Général à la Planification Écologique) a été mis en place récemment. Il a produit des données et des objectifs de baisse de CO2 à atteindre avec des recommandations d'actions intégrées dans une planification présentée en septembre 2023.

L'industrie française génère environ 20% des émissions de gaz à effet de serre (79 Mt CO2 / an en 2019), principalement au travers de quatre grandes composantes d'importance comparable : sidérurgie, cimenteries, chimie et autres industries. De plus, 36% de la consommation de combustibles y est perdue sous forme de chaleur fatale, dont une partie importante pourrait être réutilisée. Dans le secteur industriel, la SNBC fixe une diminution des émissions de 35 % à l'horizon 2030 et de 81 % d'ici 2050 par rapport à 2015. La transition vers une industrie proche du zéro carbone en 2050 nécessite une transformation en profondeur, car les transformations incrémentales ne suffiront pas. Le fonctionnement des procédés de fabrication représente actuellement les deux tiers de l'énergie consommée par les industries de transformation.

Des innovations de rupture seront nécessaires. Pour atteindre les objectifs, le secteur de l'industrie doit réaliser 20 % de gains d'efficacité énergétique entre 2010 et 2030, par tonne produite. En 2021, les feuilles de route de décarbonation ont été publiées dans une perspective sectorielle de :

- la filière Chimie, identifiant une trajectoire de réduction de ses émissions de 26% entre 2015 et 2030 ;
- la filière Ciment, identifiant une trajectoire de réduction de ses émissions de 24% entre 2015 et 2030 ;
- la filière Mines et métallurgie, identifiant une trajectoire de réduction de ses émissions de 31% entre 2015 et 2030 pour la sidérurgie intégrée, et de 9% pour l'aluminium.

La « Décarbonation de l'industrie » est un enjeu essentiel dans le cadre européen du « zéro émission de carbone » d'ici 2050. Les pistes de recherche sont nombreuses pour la conduite d'une transition économiquement efficace et la plupart intéresse le Génie des Procédés. Il s'agit de développer de nouvelles approches d'évaluation d'impacts environnementaux, des méthodes de calculs de l'empreinte carbone, des outils de modélisation et de prédiction des consommations énergétiques et des rejets, ainsi que l'utilisation de nouveaux intrants matière et énergie à moindre empreinte environnementale dans les procédés, notamment en recourant à la biomasse et la valorisation des déchets. L'intensification des procédés et la conception de procédés innovants font partie des solutions pour réduire considérablement les coûts d'investissements et l'empreinte CO2 des procédés par la réduction des matériaux de construction et des volumes de solvants à mobiliser. A l'aval, le captage et le stockage du CO2 avec le développement des procédés de valorisation sont aussi essentiels pour atteindre les objectifs de la neutralité carbone.

Les activités de recherche couvrent le développement de nouveaux procédés minimisant les émissions de CO2, les outils de modélisation et de simulation, le traitement des effluents notamment par le développement de méthodes de captage du CO2 à haut rendement énergétique, associées soit au stockage du CO2, soit à son utilisation. Les chercheurs étudient également de nouveaux indicateurs de suivi, de performance et de gestion des procédés industriels, ainsi que le renforcement du rôle des analyses de cycle de vie et des critères d'éco-conditionnalité.

La consommation d'énergie est inhérente aux processus industriels. En 2020, le mix énergétique du secteur industriel était le suivant : le gaz naturel représentait 40% de la consommation d'énergie (contre 28% de la consommation totale en France), suivi de l'électricité (35%), des produits pétroliers (9% en 2020 contre 22% en 1990), des énergies renouvelables (7%), de la chaleur commercialisée (6%) et du charbon (3% contre 11% en 1990).

La décarbonation de cette énergie peut être obtenue par des voies innovantes, principalement par l'introduction de sources d'énergie bas-carbone dans les processus industriels. Sous réserve d'une disponibilité massive d'électricité pilotable et à faible teneur en carbone, une partie de cette transition peut être réalisée par une électrification massive, que ce soit par une électrification directe des procédés ou de certaines des fonctions industrielles.

La fourniture de chaleur à moyenne et haute température est également essentielle dans de nombreux secteurs industriels : métallurgie, verre, ciment, chimie, pâte à papier, industrie alimentaire, etc.. . De nouvelles voies pour décarboner les secteurs de fourniture de chaleur doivent être explorées, en utilisant la chaleur solaire ou des combustibles sans carbone comme l'hydrogène ou l'ammoniac, ou des combustibles renouvelables comme la biomasse. Cependant, l'industrie étant une source importante de chaleur résiduelle à différents niveaux d'énergie, il est essentiel de poursuivre les recherches et de développer des technologies de pointe consacrées à la gestion optimale de la chaleur (récupération, réutilisation, conversion en électricité) ainsi que des processus de refroidissement plus efficaces (pour l'extraction de la chaleur et la production de froid) en premier lieu pour les secteurs de la métallurgie et de la transformation des plastiques.

Bien que les émissions de l'industrie nationale aient diminué de 44 % entre 1990 et 2017, des efforts d'innovation à grande échelle sont encore nécessaires pour réduire significativement l'empreinte carbone des procédés industriels.

La décarbonation de l'industrie chimique nécessite la conception de technologies de pointe pour réaliser des réactions catalytiques de manière plus éco-efficace (économie de matière, d'énergie, sélectivité, etc.), pour intensifier la réaction chimique, utiliser des solvants plus respectueux de l'environnement, et explorer de nouvelles voies d'activation des réactions chimiques. En outre, les procédés doivent également être repensés pour s'adapter à l'intermittence et à la variabilité des intrants. Même si une partie des émissions de CO₂ de l'industrie restera incompressible, les industries de l'acier et du ciment transformant respectivement le minerai de fer et le calcaire ont également besoin de nouveaux procédés spécifiques pour réduire leurs émissions de carbone, notamment les nouveaux procédés à faible teneur en carbone pour la production de ciment, la réduction directe du minerai de fer, l'utilisation de carbone biosourcé ou les fours à arc électrique pour la fabrication de l'acier.

La conversion du CO₂ en molécules de base pour l'industrie, en carburants pour les transports (par des procédés électrochimiques, photochimiques, biologiques et hybrides) ou en matériaux obtenus par minéralisation du CO₂, en polymères ou en carbone solide nécessite d'augmenter l'efficacité de l'absorption de carbone et d'exploiter l'ensemble du spectre solaire dans la transformation du CO₂ en carburants solaires.

En conclusion, trois principaux leviers sont à activer simultanément ou progressivement pour décarboner l'activité industrielle :

- l'efficacité énergétique : optimisation des sources énergétiques ;
- le mix énergétique : électrification et intégration des énergies bas-carbone et de récupération ;
- l'efficacité matière et le recyclage : recours à moins de matière première ou plus de matière recyclée.

f - Eau

Une prise de conscience collective sur la nécessité de limiter la pression sur les ressources et l'urgence climatique s'impose de plus en plus dans nos sociétés et dans ce cadre, le concept d'économie circulaire tend à se généraliser à tous les secteurs industriels et activités et aussi à celui de l'eau et de ses cycles des usages qu'ils soient agricoles, industriels, domestiques ou urbains.

Le traitement des eaux usées, au travers notamment des stations d'épuration (STEP), est un des maillons essentiels des grands enjeux de l'eau car : (i) les STEP sont le lien direct entre le cycle d'usage de l'eau et le cycle naturel et sont absolument essentielles au maintien de la qualité, de la sécurité et de l'accès aux ressources, mais aussi en contribuant de manière importante à l'amélioration de la santé des populations à travers le monde (source OMS, 2019), (ii) les STEP sont des sites industriels de transformation de la matière et de l'énergie présents sur tous les territoires et absolument non délocalisables. Néanmoins, 4,2 milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à des services d'assainissement fiables et sûrs et 80 % des eaux usées de la planète ne sont pas correctement traitées, quand on sait de plus que 36% (55% en 2050) des zones habitées sont en manque de ressources naturelles d'eau. Il est important donc de pouvoir utiliser, développer et transformer les sites industriels pour valoriser et optimiser le cycle des usages de l'eau, tant du point de vue de la préservation qualitative et quantitative des ressources en eau que de celui de son empreinte carbone et énergie.

Les eaux usées présentent aussi de très fortes potentialités de valorisation matière et énergie qu'il est nécessaire d'appréhender dans une approche globale intégrée comme cela est montré sur la figure 2 avec la station d'épuration des eaux usées (STEP ou WWTP) au cœur de ce nouveau paradigme. Tout d'abord, cette STEP se doit d'être absolument performante, robuste et intégrer toutes les problématiques liées aux polluants émergents (pesticides, médicaments, pathogènes, microplastiques, ...).

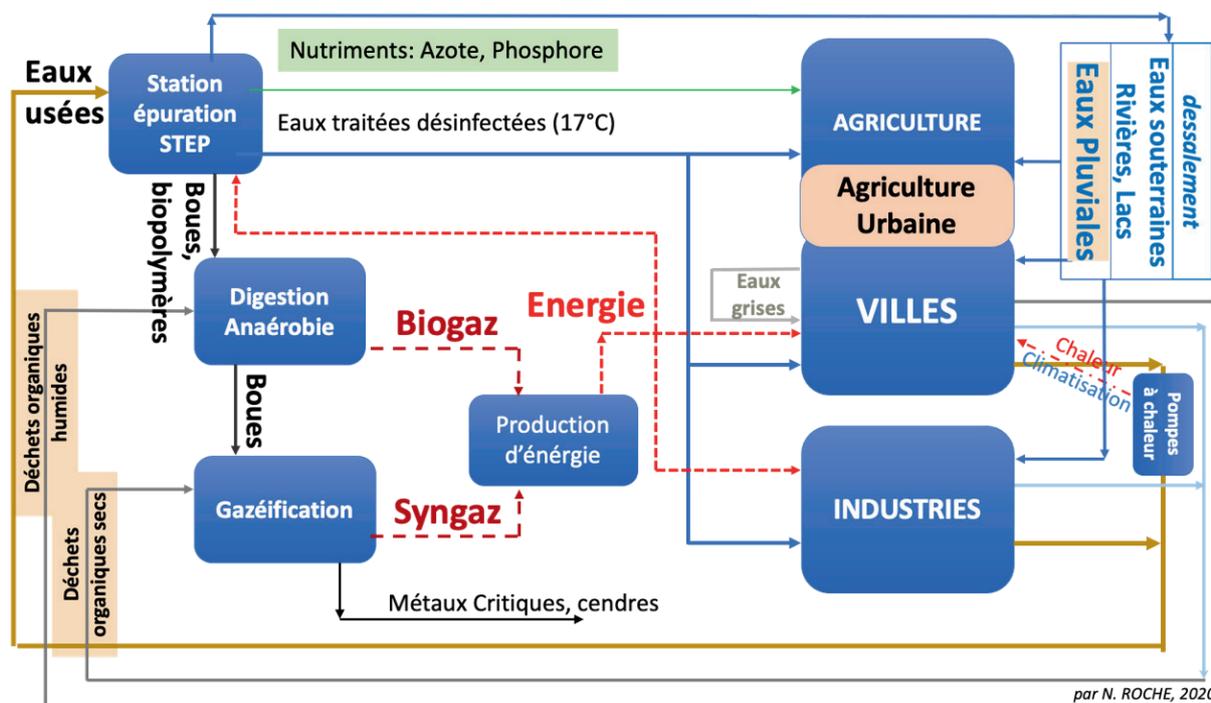


Figure 2 : Économie circulaire appliquée au cycle des usages de l'eau

La première ressource est bien entendu l'eau usée traitée (EUT) qui peut être, selon les cas, rejetée dans le milieu naturel pour assurer des services écosystémiques (débits de cours d'eau, préservation de zones humides, recharge d'aquifère, gestion du biseau salé en zones côtières...) ou aussi réutilisée pour des usages agricoles, industriels, urbains dans des conditions sûres (désinfection, séparation des réseaux, maintien de la qualité). Il est nécessaire aussi que ces usages soient proches des lieux de production de ces EUT et de ce point de vue le développement de l'agriculture urbaine, du concept de ville éponge, de la nature en ville, de boucles de production, industrielles courtes offrent de très belles possibilités qui peuvent être mises œuvre aisément ; de nombreux exemples à travers le monde le montrent bien. A des petites échelles la réutilisation locale des eaux grises (douches, lavabos) après un traitement simple et pour des usages autres que ceux destinés à la consommation humaine (chasses d'eau, arrosages des jardins et espaces verts...) présentent des potentialités d'économies de prélèvements sur la ressource en eau de l'ordre de 40%.

Du point de vue de la matière il est important de souligner l'intérêt de valorisation les nutriments (azote et phosphore) contenus dans les eaux usées à des fins d'amendements, sachant que notamment pour l'azote une séparation à la source des urines permet d'augmenter significativement son potentiel de valorisation en évitant des effets de dilution importants.

Enfin sur la filière boues des STEP il est aussi possible de produire des biopolymères et de récupérer des métaux critiques, notamment dans les cendres des procédés thermiques (gazéification, incinération). Pour l'énergie, la valorisation peut se faire sur deux grands axes : (i) la valorisation en ville de la température quasiment constante des EUT dans des pompes à chaleur et (ii) dans les STEP par la production de gaz combustibles par des procédés biologiques (méthanisation) et thermiques (gazéification). On peut noter de ce point de vue que cette production énergétique peut être augmentée en mélangeant aux boues d'autres déchets organiques humides ou secs. Ces valorisations permettent de réduire significativement, voire d'annuler ou de rendre positive l'empreinte énergétique du cycle des usages de l'eau.

Il est possible enfin d'estimer le potentiel économique de ce cycle notamment à partir des travaux de Verstraete et al. (2011). Si actuellement, en France, on estime à 140 €/an.hab (40% pour l'eau potable et 60% pour les eaux usées) le coût de l'eau en France, on pourrait (suivant un calcul simplifié) économiser 60% de ce coût total en réduisant la pression sur la ressource, en préservant les écosystèmes et en limitant les conflits entre les usages. Là aussi, cela ne pourra être fait que dans le cadre d'une approche holistique absolument interdisciplinaire, multi-échelles et en y associant tous les acteurs de la société.

Si la plupart des procédés de traitement des eaux et de valorisation des boues existent déjà, les apports du Génie des Procédés sont essentiels sur de très nombreux aspects :

- Cette approche nécessite dans un premier temps de changer les paramètres de dimensionnement et de fonctionnement. On ne traite plus l'eau pour pouvoir la rejeter dans l'environnement mais pour un autre usage avec des critères de qualité spécifiques qu'il faut pouvoir prendre en compte dès la phase de conception du projet. Aussi, passe-t-on d'une approche centralisée avec des grandes STEP (« big is beautiful ») à une approche décentralisée avec des petites STEP dont il faut s'assurer en permanence de la qualité de leur fonctionnement et de leurs performances et ce souvent à distance (« small is smart »). Des aspects spécifiques liés à la modélisation, à l'optimisation dynamique, au contrôle-commande de ces petites STEP doivent donc être développés et mis en place.
- La problématique des polluants dits émergents (produits chimiques, médicaments, nanoparticules, microplastiques) est essentielle, notamment par le fait que des boucles de recyclage vont entraîner des effets d'augmentation de la concentration des polluants qui ne seraient pas traités. Pour ces molécules, souvent présentes en faibles concentrations, il est important de développer et mettre au point des procédés de traitement complémentaires à ceux couramment utilisés actuellement dans les STEP classiques. C'est dans ce cadre notamment que des procédés hybrides ou des combinaisons innovantes de procédés sont à étudier.
- Si l'empreinte énergétique des STEP est actuellement négative, le Génie des Procédés avec ses outils d'optimisation notamment, doit permettre de la réduire systématiquement et même de la rendre positive en maximisant notamment les récupérations de chaleur et les productions de biogaz à partir des boues. De ce point de vue, ces procédés de valorisation thermique des boues doivent être spécifiquement étudiés et développés pour les boues de STEP en y associant aussi d'autres déchets organiques secs ou humides résultant des activités anthropiques.

- Sur le schéma d'application d'une approche d'économie circulaire appliquée au cycle des usages de l'eau (figure 2), le Génie des Procédés possède tous les outils de caractérisation des échelles optimales de chaque brique. En effet, toutes les options proposées peuvent être appliquées à différentes échelles : (i) habitation individuelle, (ii) immeuble, (iii) quartier, (iv) ville, (v) agglomération, (vi) région. La définition de l'échelle pertinente pour chaque procédé est un des gages essentiels de succès et de pérennité de mise en place de ces approches vertueuses.
- Enfin, il est important aussi de réduire l'empreinte carbone des STEP par le développement, la mise au point de matériaux locaux et low-cost (issus notamment de déchets) pour le traitement des eaux usées notamment dans les procédés physico-chimiques de coagulation-floculation et d'adsorption.

g - Energie

Le secteur de l'énergie va être appelé à de profondes mutations qui correspondent à la fois au soutien de la mise en place d'une Ingénierie Circulaire mais aussi à la mutation profonde qui va affecter ce secteur pour quitter les ressources fossiles. L'énergie est souvent mentionnée dans les applications et les solutions proposées s'inscrivent dans une logique de réduction de son utilisation. Du point de vue de l'énergéticien des procédés, les défis sont nombreux tant les projets dans le domaine conjoint du Génie des Procédés et de l'énergie couvrent autant les aspects de conversion primaire et secondaire, le transport, le stockage et l'utilisation finale.

Dans le cadre de l'Ingénierie Circulaire, le premier rôle que l'énergie est appelée à jouer est celui de fermer totalement la boucle lorsque la recirculation des déchets en matière ne peut pas être effectuée. Ainsi la conversion en énergie, lorsqu'elle est possible, assure la valorisation finale. Comme il a été dit plus haut, cette utilisation doit être utilisée « en dernier recours ». Cette utilisation si elle devenait pérenne entraîne des interrogations légitimes sur la nature des déchets qui seront encore à valoriser d'un point de vue énergétique échappant ainsi, a priori à toute valorisation matière. Une alternative intéressante est donc le traitement thermique en vue de la production d'un vecteur énergétique intermédiaire. Les procédés de conversion candidats à ce type de valorisation sont connus et en cours d'amélioration. Ainsi se substituant à l'incinération, la méthanisation ou la gazéification sont des procédés qu'il sera important d'optimiser du point de vue énergétique pour finir de substituer traitement et valorisation avec circularité complète. Ces voies de valorisation s'adressent à des déchets organiques. La mise en place de ces procédés dans les filières d'approvisionnement énergétique devra donc prendre en compte quelle sera la pérennité des déchets organiques associés à ces filières. La disparition programmée à terme des papiers et plastiques dans les flux en est un exemple et le coût énergétique des filières de recyclage doit être examiné au regard du service réellement rendu, la valorisation en énergie de haute qualité (vecteur hydrogène ou méthane) pouvant être un meilleur service. Le maître mot reste l'efficacité et cette efficacité doit provenir d'une meilleure appréciation des utilisations de l'énergie. Au-delà de l'industrie, le Génie des Procédés est à même d'intervenir dans l'ensemble des utilisations.

En proposant des grandeurs et des méthodologies d'analyse basées sur des principes thermodynamiques fiables, les bases de ces analyses étant posées, elles doivent continuer à être développées. L'analyse exergétique des procédés et des filières doit substituer dans les esprits (et dans les textes réglementaires) les analyses du type premier principe qui ne rendent plus compte aujourd'hui de l'efficacité globale des systèmes. Ainsi l'efficacité exergétique moyennée sur la durée de fonctionnement d'un procédé se trouve un bien meilleur estimateur qu'un coefficient de performance mesuré dans une condition standard.

Les résultats de ces méthodes (une efficacité) ont l'avantage d'être toujours utilisables dans les analyses de cycle de vie (ACV). Au-delà, les liens méthodologiques entre l'ACV et l'analyse du point de vue de l'énergétique sont indiscutables. Les questions du changement d'échelle, d'une étude vs une filière existante, de sa territorialité des effets à venir des changements liés au climat sont autant de questions qui sont à l'étude.

A la différence des grandes ressources matières, l'énergie n'est pas « circulaire » et son rejet est inévitable. Ce rejet est d'autant moins impactant qu'il s'effectue à une température proche de la température ambiante. Ainsi la diminution de ces rejets (autrement appelé chaleur fatale) doit s'accompagner d'une diminution de la température à laquelle il doit être rejeté. Dans un système industriel, l'énergie est donc appelée à avoir plusieurs « vies » c'est-à-dire plusieurs utilisations à des niveaux de températures différents, successivement de plus en plus en bas. L'intégration énergétique s'appuie aujourd'hui sur des méthodes robustes. La méthode des pincements développée initialement pour des conceptions de réseaux d'échangeurs de chaleur dans les années 1980 est aujourd'hui mature et son utilisation va au-delà des simples réseaux. Elle est utilisée en prévision pour de la planification de production pour orienter les meilleurs choix énergétiques qui permettent de proposer des solutions de distribution de l'énergie au sein des sites et en symbiose avec leur environnement proche.

Les énergies renouvelables sont pleinement associées à l'Ingénierie Circulaire. Leur développement dans le respect des règles de l'Ingénierie Circulaire reste l'enjeu fort de ces filières. Du point de vue de l'énergéticien, c'est leur intégration dans les dynamiques de production et de distribution qui, dans la prolongation des méthodes d'intégration, devra être réalisée. Cette intégration pose de nouveaux défis. Celui du stockage, dont les solutions techniques doivent être analysées par des indicateurs fiables et celle du transport pour lesquelles les méthodes développées dans le domaine des réseaux de chaleur et des distributions des eaux deviennent des méthodes potentiellement pertinentes pour le déploiement des smart-grids.

L'énergie étant traitée de manière pluridisciplinaire, l'intégration énergétique proposée par le Génie des Procédés peut aussi s'entendre comme la discipline à même d'intégrer les diverses connaissances pour mettre en place différents scénarios d'évolution des systèmes énergétiques. Cette intégration peut donc s'entendre aussi comme creuset pour agréger mais surtout quantifier et qualifier les solutions proposées par des indicateurs fiables et indiscutables.

Longtemps réduite à la clôture de la boucle par la valorisation énergétique des déchets, la circularité pour l'énergie s'orientera donc vers des axes majeurs que sont l'intégration énergétique, la conversion à partir d'énergie renouvelable et la mise en place au sein des filières d'économie circulaire d'indicateurs fiables et pérennes.

h - Agro-industries

Comme dans tous les domaines, l'Ingénierie Circulaire dans les agro-industries vise à utiliser efficacement et durablement toutes les ressources : matières premières, ressources animales et végétales, l'eau et l'énergie. Le recours accru au recyclage et au réemploi doit permettre des bénéfices tant pour l'environnement que pour l'économie. Un des principes de base est l'utilisation optimale des ressources dans les usines en intégrant l'alimentation animale, la production d'énergie (méthanisation par exemple), la transformation des biodéchets en fertilisants ou en molécules pour la chimie biosourcée.

Le tri sélectif permet de favoriser une meilleure gestion des déchets et réduire le gaspillage alimentaire ainsi que les émissions de CO₂. La France a prévu en 2020 de réduire le gaspillage alimentaire de 50% d'ici 2025 par rapport à son niveau de 2015 dans les domaines de la distribution alimentaire et de la restauration collective et, d'ici 2030, de 50% par rapport à son niveau de 2015 dans les domaines de la consommation, de la production, de la transformation et de la restauration commerciale. La biomasse est fortement sollicitée, d'où la nécessité d'optimiser l'usage des terres, sans accroître l'utilisation d'intrants, souvent carbonés, et d'eau (voir Encart 4 : Projet : MINIMEAU, Minimisation des consommations d'eau dans les agro-industries par le développement d'une approche intégrée associant Empreinte Eau et Pinch massique), et en préservant la biodiversité, l'adaptation aux changements climatiques l'introduction des nouvelles pratiques agricoles. La biomasse agricole doit satisfaire en priorité les besoins alimentaires, puis de la nutrition animale, du maintien de l'écosystème sols, notamment le stockage du carbone, et ensuite les besoins industriels dans les domaines de la chimie et de l'énergie. L'écoconception dans les systèmes agricoles et agro-industriels s'applique en premier lieu aux systèmes de production. On peut également l'appliquer à l'ensemble produit-emballage, qui peut être éco-conçu pour diminuer son impact durant la production, la conservation du produit et son éventuelle réutilisation en fin de vie. Associée à l'Ingénierie Circulaire, l'écologie industrielle et territoriale vise à créer des symbioses entre différentes activités humaines pour fonctionner comme un système écologique. A l'échelle d'un territoire, il s'agit de permettre des boucles d'échanges de ressources pour une gestion optimisée. L'Ingénierie Circulaire appliquée aux systèmes agricoles et agro-industriels vise une production alimentaire et non alimentaire de qualité et en quantité suffisante, tout en préservant et régénérant les écosystèmes.

Encart 4 - Projet collaboratif : MINIMEAU

Minimisation des consommations d'eau dans les industries agro-alimentaires par le développement d'une approche intégrée associant Empreinte Eau et Pinch massique

L'industrie agroalimentaire représente un secteur d'activité important pour l'économie française en termes d'emploi, de balance commerciale et de développement des territoires. La possibilité de disposer d'eau de qualité à des coûts supportables est une nécessité vitale pour cette industrie qui consomme aujourd'hui de 2 à plus de 10 L d'eau par L ou par kg de produit fini, ces chiffres recouvrant une forte variabilité selon les secteurs d'activité. Compte-tenu de la pression croissante sur la ressource en eau, cette industrie fait face aujourd'hui à des défis majeurs concernant son approvisionnement.

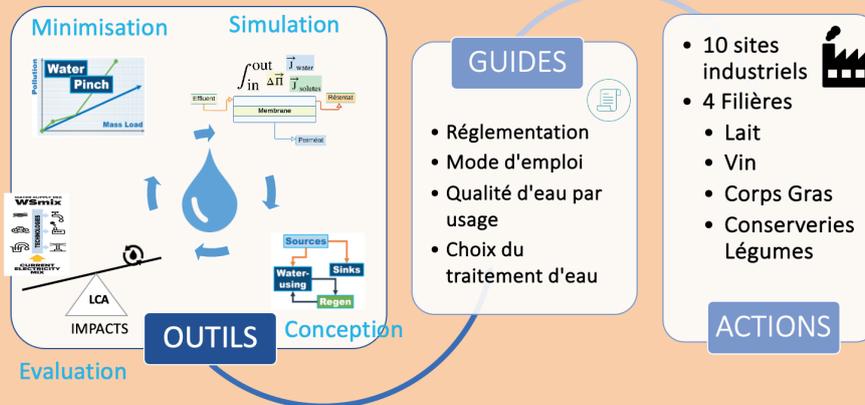
A l'exception de l'eau consommée comme ingrédient, une large part de l'eau utilisée par l'industrie agroalimentaire se retrouve sous forme d'effluents plus ou moins chargés, pouvant inclure aussi l'eau contenue dans la matière première agricole. Le traitement et la gestion de ces effluents représente dans certains cas une charge lourde pour l'industriel, ainsi qu'une perte de matière première non négligeable. De nombreux secteurs de cette industrie sont déjà engagés depuis plusieurs années dans des politiques d'économie d'eau : la mise en œuvre de bonnes pratiques, en particulier, et des mesures de bon sens, ont conduit à des économies d'eau de l'ordre de 15-20%.

Le projet MINIMEAU (ANR-17-CE10-001, voir figure ci-dessous 'projet Minimeau') visait à franchir une étape supplémentaire d'optimisation et de re-conception des réseaux d'eau, incluant la possibilité de recycler les eaux peu chargées ou les effluents aqueux après un traitement adéquat de purification.

Projet MINIMEAU : Minimisation des consommations d'eau dans les IAA



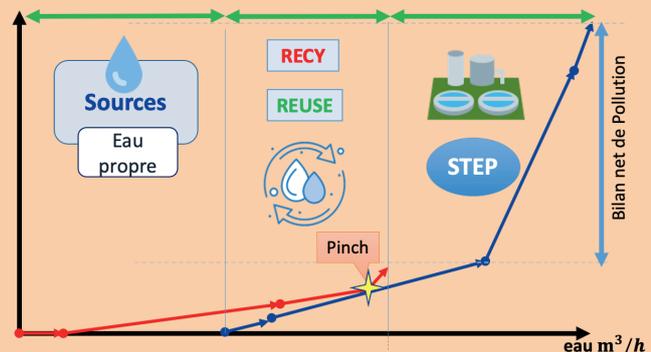
<https://minimeau.fr/>



Dans le cadre de ce projet, plusieurs logiciels pour l'éco-conception des procédés ont été développés :

- Outils d'aide à la décision permettant de reconcevoir les réseaux d'eau dans un objectif de minimisation de la consommation, utilisant la méthode du pincement eau (« Water Pinch ») (voir figure ci-dessous : 'Pinch-Eau : Minimisation des ressources d'eau propre, optimisation des flux d'eau, diminution des rejets', Nemati-Amirkolaii et al., 2019) qui a fait l'objet de développements particuliers pour gérer le cas des contaminants multiples (développement d'un module « pincement eau » dans le logiciel de simulation de procédés ProSimPlus ainsi que de l'outil Simulis Pinch Water par la société ProSim) ;
- Procédés innovants de traitement étudiés et qualifiés sur des effluents réels (filtration membranaire, avec le développement d'un module spécifique dans le logiciel ProSimPlus, utilisé pour la simulation des procédés agroalimentaires) ;
- Analyse environnementale des scénarios d'amélioration, de façon à éviter des transferts d'impacts (Empreinte eau, ACV).

Pinch-Eau : Minimisation des ressources d'eau propre, optimisation des flux d'eau, diminution des rejets



Les études effectuées sur les procédés sélectionnés dans le cadre du projet ont montré des potentiels de réduction de la consommation d'eau de l'ordre de 30 %. Plus d'informations sur ces outils sont disponibles pour une appropriation par les acteurs économiques via le site <https://minimeau.fr/>. Les résultats des méthodologies développées sont également mis à la disposition des autorités réglementaires via ce site internet pour nourrir la réflexion sur une évolution de la réglementation relative aux possibilités de recyclage ou de réutilisation de l'eau dans l'industrie alimentaire.

5 Pivoter vers l'Industrie Circulaire

(note rédigée par l'INEC)

L'originalité de l'étude



Un contexte inédit

Cette étude constitue la première étude sur l'industrie circulaire, réalisée dans un contexte global de transformation des comportements et des organisations. L'étude adresse des sujets mis en lumière par la crise : diversification des sources d'approvisionnement, relocalisation de la création de valeur, nécessité de soutenir l'emploi local et les savoir-faire dans les territoires. Le plan de relance, qui place les Régions en chefs de file de la reconstruction économique et de la gestion des ressources, a confirmé l'importance d'interroger la notion d'« économie du PIB local ».

Une analyse systémique sur l'industrie

L'approche choisie dépasse le périmètre du cœur d'usine. L'objectif est de prendre en compte l'ensemble de la chaîne de valeur : ainsi, 6 modèles économiques sont proposés pour pivoter vers l'industrie circulaire. Ils correspondent à 6 points d'ancrage, par lesquels les industries peuvent amorcer ou poursuivre un pivot vers l'économie circulaire.

Une approche territoriale

L'objectif est de rendre compte des réalités différentes des territoires et des secteurs d'activités dans une transition vers l'économie circulaire. L'INEC et OPEO se sont donc adressés à plusieurs industries, de taille, de secteurs et de localisation géographique variés dans le but d'enrichir l'étude de points de vue pluriels et spécifiques.

Une étude adressée aux industriels, acteurs institutionnels et collectivités

L'étude documente des leviers d'action à destination des industries mais décline également des recommandations à destination des institutions et collectivités, garantes d'un cadre structurel incitatif.

La méthodologie

Basée sur des entretiens réalisés auprès de 18 industriels avancés dans leur transition vers le circulaire, et diverses (taille, secteur, localisation géographique), l'étude s'appuie sur des retours d'expériences concrets. Les démarches plurielles mises en place par les industriels permettent de recenser les freins et leviers à toutes les étapes de la mise en place d'une stratégie d'économie circulaire. Conduits auprès des directions générales, RSE, développement durable ou financières et de postes opérationnels, les entretiens ont apporté différentes visions de l'économie circulaire dans l'industrie. Ces entretiens irriguent les différentes parties de l'étude.

Conjointement à ces entretiens, un questionnaire quantitatif a été envoyé à des acteurs industriels disséminés sur le territoire. Selon les résultats, 85% des interrogés (63 répondants) considèrent l'économie circulaire comme une véritable opportunité pour l'industrie : ce chiffre confirme l'intérêt de présenter des modèles et des leviers pour opérer une transition.

1. L'industrie linéaire, un modèle dans l'impasse face aux enjeux actuels

Le modèle industriel actuel, linéaire, est un modèle qui ne peut pas répondre à la fragilité du tissu industriel français, (re)mise en lumière par la crise sanitaire. Les progrès relatifs au recyclage des déchets ou à l'efficacité énergétique, bien qu'encourageants et à saluer, ne seront pas suffisants pour que l'industrie soit soutenable face aux urgences environnementales. Rigidité des supply chains, vulnérabilité face aux approvisionnements risqués, et destruction de services environnementaux liés à la perte de biodiversité, les pressions qui pèsent sur l'industrie sont plurielles. Elle doit donc s'adapter et au-delà de l'industrie 4.0, devenir une industrie du futur « circulaire ».

2. Rendre l'industrie robuste et résiliente grâce au pivot vers des modèles économiques circulaires

Le pivot est un concept issu du monde des start-ups qui désigne un changement de stratégie et de modèle économique. Les entretiens réalisés dans l'étude ont permis de dégager 6 modèles économiques, sur lesquels repose un pivot vers l'industrie circulaire. Ces modèles ont pour objectifs l'allongement des cycles d'utilisation de la matière, grâce à de nouvelles propositions de valeur en amont du recyclage, et la réduction des externalités négatives. Ils demandent de repenser le design des produits et les modèles industriels en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de valeur, de l'extraction des ressources à leur utilisation et au réemploi des produits. Un changement de modèle nécessite une approche systémique : la mission de l'entreprise est étendue à d'autres fonctions que la seule création de valeur économique. Pour ce faire, l'approche s'appuie sur 3 leviers d'accélération : agilité des organisations, écosystèmes étendus et apport des nouvelles technologies au service de la circularité.

3. Une transformation bénéfique et nécessaire, pour une industrie leader du changement

Grâce à la transition vers la circularité, les équipes sont réengagées et l'industrie devient résiliente, compétitive et créatrice de valeur dans les territoires. Innovations, emplois locaux et valorisation des savoir-faire : le pivot vers l'industrie circulaire constitue l'avènement d'une « économie du PIB local » décarbonée, plus proche des ressources et des clients. Par ailleurs, représentant 12% du PIB national, l'industrie a le potentiel d'être leader pour conduire une transition globale vers un monde sobre en ressources et face aux crises potentielles futures.

Couplés à une demande plus responsable, les modèles circulaires sont les mieux à même de répondre aux enjeux économiques, sociaux et environnements et gagneraient à devenir les standards industriels de l'industrie du futur.

4. Des industriels pionniers en mouvement, qui réinventent l'industrie

85% des industriels interrogés considèrent l'économie circulaire comme une véritable opportunité pour l'industrie d'améliorer sa compétitivité et de développer de nouveaux marchés. Pour 75% d'entre eux, la crise sanitaire n'affecte pas cette tendance.

Des industriels pionniers ont déjà amorcé une transition majeure et inspirante : Schneider Electric, Michelin, la fédération ENVIE, Areco, Renault (voir Encart 5 : Re-factory Renault Flins), etc. Interrogés pour la réalisation de cette étude, ils témoignent des leviers qu'ils ont activés pour opérer un changement de leurs modèles économiques. D'autres acteurs, challengeurs, comme Soft'In ou Etnisi sont des entreprises nativement circulaires, qui viennent questionner les modèles traditionnels pour mieux les réinventer.

D'autres acteurs comme La Poste ou Agromousquetaires se positionnent depuis plusieurs années sur ces questions, au regard de leurs activités et capacités, créant ainsi un effet d'entraînement pour de plus petits acteurs.

5. Des modèles encore peu répandus, un changement d'échelle à opérer

Bien que certaines entreprises soient positionnées sur le sujet, le pivot vers l'économie circulaire est loin d'être abouti pour l'industrie dans son ensemble. Moins de 27% des industriels ont engagé une transformation de leurs chaînes de valeur au-delà des cœurs d'usine et moins de 25% repensent le design de leurs produits au-delà de la recyclabilité et de la réduction des coûts. Concernant les modèles économiques, 34% se positionnent sur l'allongement de la durée de vie des produits et 19% sur l'économie de fonctionnalité (vente de l'usage d'un bien ou d'un service et non du bien lui-même).

L'étude réalisée montre que les entreprises qui réussissent leur transition sont celles qui ont placé la circularité au cœur de leur stratégie et de leur gouvernance avec une déclinaison des enjeux dans l'organisation et les processus. L'environnement sort alors du cadre de la RSE pour intégrer l'ADN de l'entreprise. Peu d'entreprises ont réussi à passer ce cap : 36% des industriels déclarent avoir intégré la circularité dans leur stratégie, mais 22% seulement l'ont décliné dans une feuille de route pilotée.

6. 2021, une année pour accélérer la transition, au-delà des freins rencontrés

L'alignement du politique, de la demande et des investisseurs est sans précédent. Les étudiants et les équipes expriment de plus en plus leurs attentes d'une transformation profonde de l'industrie, quelle que soit leur génération. Comment accélérer la transition ?

Les chiffres issus de l'enquête montrent que d'importants freins internes aux organisations subsistent : l'économie circulaire n'est pas toujours comprise et connue, les savoir-faire manquent et les bénéfices économiques ne sont pas assurés sur le court terme.

Le pivot vers la circularité apparaît donc comme un coût, alors qu'il s'agit en réalité d'un investissement sur le long terme. Des freins plus structurels viennent s'additionner à cela et contraignent les acteurs qui souhaiteraient s'engager dans cette transformation. Des leviers existent et les industriels appellent à différents soutiens d'ordre réglementaire, assurantiel et financier, auxquels doit s'ajouter un important portage politique pour parvenir à une transition globale.

L'année 2021 constitue le moment idéal pour accélérer et faire émerger dès maintenant l'industrie circulaire du futur.

A propos de l'Institut National de l'Économie Circulaire (INEC)

Fondé en 2013, l'Institut National de l'Économie Circulaire est l'organisme de référence et d'influence autour de l'économie de la ressource. Sa mission est de fédérer l'ensemble des acteurs publics et privés pour promouvoir l'économie circulaire et accélérer son développement. Organisme multi-acteurs, il est composé de plus de 150 membres : entreprises, fédérations, collectivités, associations, et universités.

Plus d'informations sur <https://institut-economie-circulaire.fr/>

Encart 5

Re-factory Renault Flins

Re-Factory Flins : première usine européenne d'économie circulaire

Le site de Flins se transforme et met en place de nouvelles activités et de nouveaux métiers qui s'appuient sur un écosystème ouvert sur le territoire et ses filières. Son ambition industrielle est unique. Il s'agit d'être la première usine européenne d'économie circulaire dédiée à la mobilité, avec un objectif de bilan CO₂ négatif à 2030. Déployée entre 2021 et 2024, Re-Factory s'articule autour de quatre pôles, dont les expertises permettent d'accompagner toute la vie du véhicule, en agissant sur les principales composantes de l'économie circulaire.

2025
1 910 à 2 110 postes



Re-trofit

- ✓ Factory VO
- ✓ Ouverte en septembre 2021
- ✓ 6 000 unités déjà reconditionnées
- Extension / deuxième Factory VO
- Carrosserie lourde
- Retrait de véhicules utilitaires



350 à 385 postes



Re-start

- ✓ Centre d'innovation de l'industrie
- ✓ Retrait de 200 robots (2021/22)
- ✓ Impression 3D : 13 000 pièces produites (2021/22)
- ✓ Campus : formation professionnelle
- ✓ 150 collaborateurs reconvertis
- ✓ 7 partenaires académiques et industriels
- ✓ Centre de prototypage de véhicules utilitaires
- Incubateur Recherche et Développement
- Campus : formations académiques



320 à 360 postes



Re-energy

Produire, stocker et gérer des énergies vertes

- ✓ Réparation des batteries
- ✓ 2 000 batteries réparées
- ✓ Stockage d'énergie
- Advanced Battery Storage
- Deuxième vie des batteries kWh (2022)
- Hydrogène, en partenariat avec HYVIA
- Piles à combustible
- Stations de recharge et fourniture d'hydrogène



40 à 135 postes



Re-cycle

Optimiser la gestion des ressources et intégrer les matériaux recyclés ou réemployés

- ✓ Pièces de réemploi et de rechange
- ✓ Boucles courtes matières
- ✓ 100 000 pots catalytiques (2021)
- ✓ 500 tonnes de pare-chocs (2021)
- Finalisation du transfert des activités de Choley-le-Roi
- Réparation mécatronique



1 200 à 1 230 postes

✓ : Activités lancées en 2021
→ : Activités au déploiement prévu sur 2022/2023

En 2023 l'INEC a apporté son expertise aux travaux de CITWELL et SOROA pour la réalisation du plaidoyer « Supply Chain Circulaire », une approche novatrice et qui s'apparente à celle du Génie des Procédés et de l'Ingénierie Circulaire. Ce plaidoyer s'adresse aux pouvoirs publics, aux décideurs politiques, pour alerter de la nécessité d'agir sur six facteurs clés de réussite nécessaire pour pivoter vers l'industrie circulaire et une société fondée sur le 12eme Objectifs de Développement Durable (ODD12) de l'Agenda 2030 des Nations Unis, faire plus et mieux avec moins. Ces six facteurs clés sont :

- 1. Assurer l'interopérabilité des données pour la traçabilité et la performance de la supply chain.** Sans partage fiable de l'information il ne peut y avoir efficacité dans la chaîne de valeurs.
- 2. Définir la bonne échelle multi-locale liée aux ressources et aux acteurs.** Chaque matière, chaque produit, chaque mode de consommation a son périmètre d'efficacité qui nécessite de structurer le territoire à la bonne échelle pour assurer une efficacité des boucles de l'économie circulaire.
- 3. Déployer une infrastructure (physique et Système d'Information) adaptée aux nouvelles boucles d'économie circulaire.** Le pilotage des flux en économie circulaire s'inscrit dans une approche spatiale très dense et complexe. Elle doit également intégrer les enjeux d'arbitrage dans les usages dans le temps d'une matière. Les systèmes actuels de support des flux physiques et d'informations ne sont pas adaptés et sont à repenser voire à créer.
- 4. Systématiser les pratiques de circularité « hautes » où on réutilise au maximum les produits pour le même usage (orientation de la demande).** Pour atteindre les objectifs de performance dans l'usage de la matière, une démarche d'amélioration continue pour toujours plus de performances d'usage est à enclencher y compris et surtout sur les produits manufacturés déjà en service, ce que l'on peut appeler l'amélioration des performances originelles que ce soit technique (up-grader) ou d'usage (économie de la fonctionnalité).
- 5. Créer les conditions pour avoir les moyens physiques, industriels et humains capables de traiter les flux circulaires.** Les pouvoirs publics doivent planifier cette mutation en accompagnant et stimulant les nouvelles organisations des flux, les capacités d'ingénierie nécessaires.
- 6. Ecoconcevoir les flux et services pour garantir un fort niveau de circularité.** Une toute nouvelle ingénierie des systèmes est à mettre en œuvre, elle doit pouvoir s'assurer d'être dans une démarche de recherches permanentes d'amélioration de la performance d'usage sur les ressources, de cranter et de continuer à progresser. Elle s'apparente à l'ingénierie des procédés, englobant l'aval de la consommation.

Conclusion, recommandations et perspectives

Dans les problématiques globales de l'économie circulaire, force est de constater que la version relative aux sciences de l'ingénieur intitulée « Ingénierie Circulaire », intègre bien tous les fondements scientifiques et paradigmes du Génie des Procédés : approche systémique multi-échelles, bilan matière, bilan énergie, modélisation, simulation, optimisation, gestion des flux. Le Génie des Procédés est donc naturellement un élément essentiel pour la génération et la mise en place nécessaire de ce nouveau modèle économique. Le développement de l'économie circulaire doit permettre de diminuer le prélèvement et les impacts sur les ressources et la biodiversité, de réduire la production de déchets et de restreindre la consommation d'énergie en prenant en compte les équilibres économiques et sociaux. L'économie circulaire vise à mettre en place un nouveau modèle de société, qui trie, recycle ou valorise, optimise les stocks et les flux de matières, d'énergie et de déchets en intégrant la notion de partage des flux entre les différents usagers ou entre différents sites, industriels ou autres, inter-connectés. C'est un champ en pleine expansion pour le Génie des Procédés, avec notamment le développement des filières de recyclage. Ces filières touchent la plupart des secteurs industriels.

Dans ce livre blanc, les différents enjeux ont été abordés, enjeux académiques, industriels, au travers des différentes thématiques de l'Ingénierie Circulaire, qui ont été présentés lors des journées Cathala-Letort de la SFGP des 16 & 17 novembre 2021. On a pu noter un dynamisme réel en France, une certaine maturité des approches, des solutions proposées et développées au niveau des laboratoires jusqu'aux réalisations industrielles. Un partenariat fort est déjà établi entre les mondes académique et industriel et ce sur de nombreux piliers de l'Économie Circulaire (Recyclage, Eco-conception, Écologie Industrielle et Territoriale, Approvisionnement Durable...).

L'orientation est claire : tout produit auparavant destiné à l'abandon ou rejeté, doit être désormais considéré comme une ressource potentielle. Le développement de nouvelles compétences croisées, l'association de filières industrielles, l'écoconception et les efforts réalisés dans le domaine de l'ingénierie ouvrent des perspectives d'innovation et de réduction des coûts qui permettront de franchir le pas pour que cette ressource potentielle devienne une réelle matière première secondaire. Sur ce point, des problématiques liées à une évolution nécessaire de la législation actuelle nationale ou européenne ont été fréquemment soulevées tout comme celles liés aux questions sociétales et économiques.

Au cœur de ces innovations, les outils du Génie des Procédés (approches systémiques, multi-échelles, et multi-physiques) sont apparus comme tout à fait adaptés aux défis à relever pour faire pivoter notre système productif vers la circularité. Une forte interdisciplinarité et approche transverse des activités avec un lien fort avec la notion de territoire sont une autre caractéristique des projets d'Ingénierie Circulaire. Des freins cependant - sociaux, politiques, économiques, réglementaires - limitent encore la montée en régime de l'économie circulaire. Les enjeux associés à la nature complexe et la variabilité des intrants (eaux, déchets, bioressources, métaux, matériaux) constituent sans aucun doute la spécificité de l'Ingénierie Circulaire. Ils ouvrent de nouvelles perspectives pour la recherche mais également aussi pour la formation des futurs ingénieurs et chercheurs de notre discipline.

Ces perspectives doivent être corrélées avec les enjeux actuels de la stratégie d'accélération de France 2030 sur la décarbonation de l'industrie et le développement de produits ou de fonctions issus de ces nouvelles ressources.

Les recommandations, pour le Génie des Procédés et l'industrie, issues de ce travail sur l'Ingénierie Circulaire peuvent être déclinées dans différentes directions qu'il convient de mettre en œuvre rapidement :

- Développer des approches "systèmes" avec l'établissement de modèles permettant d'aborder la transition de l'économie linéaire à l'économie circulaire ;
- Coupler des analyses de cycle de vie avec les simulations de procédés, la gestion des flux de matières, de produits et d'énergie et les analyses économiques ;
- Développer des approches pluridisciplinaires avec l'intégration des sciences humaines et sociales ;
- Développer de procédés flexibles permettant de s'adapter aux différentes ressources mises en œuvre ;
- Rechercher des données thermo-physiques sur ces nouvelles ressources pour l'établissement de modèles fiables des procédés ;
- Développer des capteurs spécifiques pour le contrôle avancé des procédés liés notamment aux avancées de l'intelligence artificielle ;
- Développer une démarche intégrée sur les économies de ressources naturelles, d'eau, ou sa réutilisation, d'énergie et le stockage du carbone dans la mise en œuvre des procédés ;
- Développer des procédés propres, efficaces et sûrs sur le concept des solutions fondées sur la nature ;
- Intégrer tous ces concepts d'Ingénierie Circulaire, au plus tôt, dans les programmes de formations de techniciens et d'ingénieurs en Génie de Procédés.

Références

- Bellini, B., Janin, M., 2020. Éco-conception : état de l'art des outils disponibles. Techniques de l'Ingénieur
- Bhosekar, A, Lerapetritou, M., 2018. Advances in surrogate based modeling, feasibility analysis, and optimization: a review. *Comput. Chem. Eng.* 108, p 250–267.
- Blengini, G., Latunussa, C., Eynard, U., Matos, C., Georgitzikis, K., Pavel, C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F., Pennington, D., 2020. Study on the EU's list of Critical Raw Materials. Final Report Publications Office of the European Union <https://data.europa.eu/doi/10.2873/11619>
- Boix, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Domenech, S., 2015. Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review. *J. Clean Prod.* 87, p 303-317.
- Gani, R., Bałdyga, J., Biscans, B., Brunazzi, E., Charpentier, J. C., Drioli, E., et al., 2020. A multi-layered view of chemical and biochemical engineering. *Chem. Eng. Res. Des.* 155, p 133–145.
- Grosse, F., 2014. Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières. *Annales des Mines - Responsabilité et Environnement.* 76, p 58-63.
- Grossmann, E., 2004. Challenges in the new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment. *Comput. Chem. Eng.* 29 (1), p 29–39.
- IEA., 2021. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions. IEA Paris <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>, License: CC BY 4.0
- Laínez, J.M., Schaefer, E., Reklaitis, G.V., 2012. Challenges and opportunities in enterprise-wide optimization in the pharmaceutical industry. *Comput. Chem. Eng.* 47, p 19–28.
- Lee, J.H., Shin, J., Realff, M. J., 2018. Machine learning: overview of the recent progresses and implications for the process systems engineering field. *Comput. Chem. Eng.* 114, p 111–121.
- Le Moigne, J.L., 2006. La théorie du système général. Théorie de la modélisation, www.mcxapc.org, « collection : Les Classiques du Réseau Intelligence de la Complexité, format e-book », (1re éd. 1977, Presses Universitaires de France, rééd.1986, 1990, 1994).
- Le Moigne, J. L., 1994. La théorie du système général : théorie de la modélisation. FeniXX.
- Lhotellier, J., Lees, E., Bossanne, E., Pesnel, S., 2018. Modélisation et évaluation ACV de produits de consommation et biens d'équipement. Rapport ADEME.
- Nayak, A., Bushan, B., 2019. An overview of the recent trends on the waste valorization techniques for food wastes. *Journal of Environmental Management*, 233, p352-370.

Ning, C., You, F., 2017. A data-driven multistage adaptive robust optimization framework for planning and scheduling under uncertainty. *AIChE J.* 63 (10), p 4343–4369.

Nemati-Amirkolaii, K., Romdhana, H.M., Lameloise, M.L., 2019. Pinch Methods for efficient Use of Water in Food Industry: A Survey Review. *Sustainability*, 11 (16), 4492

Pistikopoulos, E.N., Barbosa-Povoa, A., Lee, J.H., Misener, R., Mitsos, A., Reklaitis, G.C., Venkatasubramanian, V., You, F., Gani, R., 2021. Process systems engineering – The generation next? *Comp. Chem. Eng.* 147, 107252.

Sargent, R.W.H., 1983. Advances in modelling and analysis of chemical process systems. *Comput. Chem. Eng.* 7, p 219-237.

Verstraete, W., Vlaeminck S.E., 2011. Zero Waste Water: short-cycling of wastewater resources for sustainable cities of the future, *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 18:3, p 253-264

XXI^{ÈMES} JOURNÉES CATHALA-LETORT



16 & 17 Nov. 2021
FIAP Jean Monnet, Paris

L'INGENIERIE CIRCULAIRE une brique essentielle de l'Économie Circulaire

Journées de perspectives Cathala-Letort
de la Société Française de Génie des Procédés (SFGP)

Présentation de la journée

Après le livre blanc du Génie des Procédés en France publié en 2017 et celui sur l'Usine du Futur en 2019, la SFGP poursuit sa réflexion sur les grands défis industriels et sur les apports et paradigmes de l'Ingénierie Circulaire pour un développement pérenne et adapté de l'Économie Circulaire. Les progrès vers une économie circulaire et une industrie compétitive sont dans l'axe et le cap tracés par le Green Deal et le plan de relance français.

Ainsi, la SFGP organisera les 16 et 17 novembre prochain à Paris, des journées Cathala-Letort de réflexion et de prospective sur l'Ingénierie Circulaire. L'objectif est de démontrer l'intérêt de l'ingénierie, et plus particulièrement du Génie des Procédés, dans la problématique de l'économie circulaire. Nous distinguons l'économie circulaire (approche interdisciplinaire globale et intégrée pour une économie durable), de l'ingénierie circulaire (adaptation des procédés, nouvelles filières de production, modélisation systémique...). L'ingénierie circulaire doit être considérée comme l'une des briques de l'économie circulaire. Le Génie des Procédés est très impliqué dans les thématiques associées à l'économie circulaire, comme l'écologie industrielle et territoriale, l'écoconception des procédés, la valorisation des bioressources et la bioéconomie, l'approvisionnement durable, le recyclage et la valorisation des effluents liquides et solides et le traitement des gaz et la valorisation du CO₂.

Au cours de ces journées, un panorama des projets académiques et industriels français sera présenté, avec un focus sur les réalisations industrielles (Start-ups, PMI-PME, ETI, GE) dans les domaines de la chimie fine, de la chimie industrielle, de l'environnement, de l'agro-alimentaire, des biotechnologies et de l'énergie. Les aspects plus généraux seront également abordés à travers les méthodologies employées, les approches interdisciplinaires et les coopérations intersectorielles mises en place, mais aussi par l'évaluation des impacts socio-économiques et environnementaux. Les conclusions de ces journées seront menées en partenariat avec les grands acteurs territoriaux (Union Européenne, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, ADEME, INEC, Régions, métropoles...) indispensables à la réussite de tels projets, que nous savons essentiels à la transition environnementale. Ces journées donneront lieu à la rédaction de perspectives mettant en évidence les verrous scientifiques et technologiques et proposant des axes de recherche pour lever ces verrous et réunir les conditions d'une industrie française forte, innovante et intégrée à son territoire.

Retrouvez toutes les informations en ligne sur le site de la SFGP

Mardi 16 Novembre

- 9h00 :** *Accueil*
- 9h30-9h45 :** Ouverture de la journée avec la présence de François-Michel LAMBERT, président de l'Institut National de l'Economie Circulaire et Député des Bouches du Rhône et François NICOL, président de la Société Française de Génie des Procédés
- 9h45-10h30 :** Conférence : campus des Métiers et Qualifications pour l'Industrie Circulaire et la Mobilité: répondre aux besoins en compétences et innovations pour REFACTORY et les filières industrielles associées, Yvan CHASTEL, Expert Leader Métaux et Procédés, Groupe Renault, et Directeur opérationnel du CMQ ICM
- 10h30-11h30 :** Conférence : Circular Economy in Europe – Status, Prospects and Needs, Prof. Magnus FRÖHLING (Technical University of Munchen)
- 11h30-12h00 :** Panorama des projets académiques français en Ingénierie Circulaire, Sophie DUSQUENE
- 12h00-13h30 :** *Pause déjeuner*
- 13h30-15h30 :** Projets industriels et innovation (partie 1)
- ECONICK : Valorisation de métaux par agromine dans le cadre de l'économie circulaire, Marie-Odile SIMONNOT
- GRT-Gaz : Plainenergie: mise en pratique d'un projet d'écologie territoriale, B. SIMON
- SECHE : Du déchet dangereux à la ressource rare, l'exemple de la régénération du brome sur le site Séché Environnement de Saint-Vulbas (Ain), Marc HENRY
- ARKOLIA Energies : Solution autonome de « Power-to-Gas » par couplage innovant de procédés d'adsorption de CO₂, de méthanation biologique et de production d'électricité renouvelable, Stéphane HATTOU
- 15h30- 16h00 :** *Pause*
- 16h00-17h30 :** PENNAKEM : EcoXtract ? de la paille à l'optimisation d'un procédé en continu dans le monde de l'extraction oléoprotéagineuse, Mickael BARTIER
- VEOLIA : EcoSIM : Concevoir en plastique recyclé, Patrick MUSY
- ALGOSOURCE – VICAT : Projet CIMENTALGUE : les microalgues appliquées à l'économie circulaire du ciment», Marie Godart-Pithon (VICAT), Christophe Lombard (AlgoSource).
- 17h30-18h :** Remise du prix de thèse 2021 de la SFGP sponsorisé par ProSim
- 18h00-19h :** *Cocktail offert par la SFGP*



Mercredi 17 Novembre

- 9h00 :** *Accueil*
- 9h-10h30 :** Projets industriels et innovation (partie 2)
- PROSIM : Réduction des consommations d'eau dans l'industrie agro alimentaire par la méthode du pincement, Laura FARRANT et Marie-Pierre LABAU (CTCPA), Quentin DUVAL et Olivier BAUDOUIN (ProSim)
- FGWRS-FIRMUS : La valorisation matière et énergie des eaux grises, Pierre MAGNES
- ROQUETTE-FRERES : Bioraffinerie du futur : Enjeux technologiques pour les procédés, Baptiste BOIT
- CARBIOS : Enzymes: innovative solutions for reinventing the lifecycle of plastics, Alain MARTY
- 10h30-11h00 :** *Pause-café*
- 11h00-12h00 :** Table-ronde «Pivoter vers l'industrie circulaire» avec des acteurs territoriaux et institutionnels, organisée avec Emmanuelle LEDOUX, DG de l'INEC et la participation de Thibaut CANTAT (CEA) et David MAIZERET (FORNELLS)
- 12h00-12h30 :** Conclusions et première feuille de route
- 12h30 :** *Pause déjeuner*

L'édition de ce livre blanc est une initiative de la Commission Ingénierie Circulaire de la Société Française de Génie des Procédés.

Coordonnateurs :

Nicolas ROCHE et Jack LEGRAND

Contributeurs :

Julie ALBRECHT - INERIS

Violaine ATHES - AgroParisTech, UMR SayFood, Paris Saclay

Olivier AUTHIER - EDF

Olivier BAUDOUIN - Fives ProSim

Michel BERTEIGNE - Séché Environnement, Saint-Vulbas

Catherine BONAZZI - AgroParisTech, UMR SayFood, Paris Saclay

Pierre BUFFIERE - Laboratoire DEEP, INSA Lyon

Yvan CHASTEL - Renault

Sophie DUQUESNE - UMET, Centrale Lille Institut

Sylvain DURECU - Séché Environnement, Saint-Vulbas

Claude Gilles DUSSAP - Institut Pascal, Université Clermont Auvergne

Jean-Henry FERRASSE - M2P2, Université Aix-Marseille

Yannick GOURBEYRE - Veolia

Marc HENRY - Séché Environnement, Saint-Vulbas

Frédéric HUET - Université de Technologie de Compiègne

Frédéric HUMMEL - TREDI, Saint-Vulbas

Pierre KIENER - Michelin

François-Michel LAMBERT - ancien député - fondateur de l'INEC

Emmanuelle LEDOUX - INEC

Jack LEGRAND - GEPEA, Nantes

Clément LEVARD - CEREGE, Université Aix-Marseille

Christophe LOMBARD - société AlgoSource Technologies

Ludovic MONTASTRUC - INP-ENSIACET, Laboratoire de Génie Chimique, Toulouse

Ange NZIHOU - RAPSODEE, IMT Mines, Albi

François NICOL - Veolia

Etienne PAUL - INSA - Toulouse Biotechnology Institute

Agnès PILAS-BEGUE - Synergiles

Martine POUX - INP-ENSIACET, Laboratoire de Génie Chimique, Toulouse

Nicolas ROCHE - CEREGE, Université Aix-Marseille

Olivier SCHOEFS - Université de Technologie de Compiègne

Jean-Luc SIMON - Fédération Française des Biotechnologies

Avec le soutien de :





Société Française de Génie des Procédés

28 rue Saint-Dominique
75007 PARIS
secretariat@sfgp.asso.fr
www.sfgp.asso.fr

Juin 2024

ISBN 978-2-910239-88-6