

INGENIERIE CIRCULAIRE

Procédés et Chimie pour une industrie
durable ancrée dans son territoire

Synthèse du Livre Blanc

Société Française de
Génie des Procédés



AVANT-PROPOS

L'Ingénierie Circulaire, un nouveau concept du génie des procédés

Approche systémique, bilan matière, bilan énergie, optimisation, gestion des flux... L'économie circulaire intègre dans ses concepts mêmes les fondements du génie des procédés. Ce dernier est donc naturellement un élément essentiel à la construction de ce nouveau modèle économique.

L'économie circulaire 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 interconnectés. Elle ne verra le jour qu'à la condition d'une réelle écoconception 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'écoconception du produit doit ainsi s'intégrer à l'écoconception de l'usine, elle-même faisant partie d'un écoparc industriel inscrit dans son territoire.

Face à ces nouveaux défis et pour accompagner une réindustrialisation durable et compétitive, la Société Française de Génie des Procédés a décidé de développer le concept d'Ingénierie Circulaire et d'y consacrer un Livre blanc dont vous trouverez ici une synthèse. Les exemples mis en avant dans ce 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. Le développement de nouvelles compétences croisées, l'association de filières industrielles, l'écoconception 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. L'évolution nécessaire de la législation actuelle (nationale ou européenne), ainsi que les questions économiques et sociétales, constituent toutefois des freins majeurs à cette démarche.

Je vous laisse découvrir dans les pages qui suivent comment le concept d'Ingénierie Circulaire rend possible une réindustrialisation responsable au plus près du citoyen.

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 depuis le début du 20ème siècle a permis de sortir de la pauvreté une partie majeure de la population et d'allonger la durée de vie des femmes et des hommes. Cependant, elle s'est accompagnée d'une hyper consommation exigeant une production mondialisée et débridée, qui entraîne l'humanité à sa perte face à la finitude des ressources accessibles et de l'équilibre planétaire.

Nous devons à présent revoir nos modèles, nous inspirer de ceux qui ont permis résilience et durabilité à des communautés humaines depuis toujours et les projeter dans le monde d'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, reste à bâtir. Elle nécessitera des évolutions profondes : dans les concepts de consommation, la notion de propriété, les incitations marketing et commerciales, mais aussi les flux et les interactions entre acteurs, à commencer par les industries. Le partage de l'usage, la réutilisation des composants, la « circularité haute », qui va de l'amélioration des performances originelles d'un produit jusqu'à l'intensification d'usage, sans oublier le recyclage matière, sont autant de défis qui devront être relevés. Or, anticiper et adapter exige une capacité d'ingénierie qui reste à structurer, notamment au niveau de la conception. C'est la raison pour laquelle l'Ingénierie Circulaire doit avoir une place centrale dans la construction de nouveaux modèles et s'accompagner d'un renforcement des expertises en la matière.

À ce titre, les travaux de la Société Française de Génie des Procédés sur 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'Economie Circulaire,

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

Ancien député

- 
- 2** Avant-propos
 - 3** Préface
 - 5** Du génie des procédés à l'Ingénierie Circulaire
 - 7** Écosystèmes et enjeux
 - 10** Grands principes et exemples d'applications de l'Ingénierie Circulaire
 - 16** Recommandations
 - 17** La Société Française de Génie des Procédés

Ce document est une synthèse du Livre Blanc sur l'Ingénierie Circulaire publié par la Société Française de Génie des Procédés.

La version intégrale est disponible sur le site internet de la SFGP (www.sfgp.asso.fr)

DU GENIE DES PROCÉDES A L'INGENIERIE CIRCULAIRE

L'Ingénierie Circulaire vise à développer des méthodes d'ingénierie capables de créer des 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 ».

Dès lors, il n'est pas étonnant de constater que l'Ingénierie Circulaire intègre les fondements et paradigmes du génie des procédés et du génie chimique : approches systémiques, bilans matière, bilan énergie, modification chimique de la matière, 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 de l'économie circulaire.

L'économie circulaire, on le sait, 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.

Elle vise à mettre en place un nouveau

modèle de société fondé sur le tri, le recyclage, la valorisation, le réemploi, l'optimisation des stocks et des flux de matières premières, d'énergie et de déchets ; une société qui intègre la notion de partage des flux entre les différents usagers ou sites interconnectés, qu'ils soient industriels ou non.

C'est un champ en pleine expansion, qui requiert une approche fine et holistique. 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.

Enfin, 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 **pilliers 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 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 (bien ou service).

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 des matières premières issues de la biomasse ou des déchets. L'apport de la chimie est essentiel pour la caractérisation de ces nouvelles matières premières, par nature complexes.

Dans son rôle d'animation et de mise en réseau des compétences scientifiques de génie des procédés sur le territoire français, la Société Française de Génie des Procédés (SFGP) a organisé son activité autour de **groupes thématiques** qui ont des relations très fortes avec l'Ingénierie Circulaire. Enfin, la SFGP a organisé en novembre 2021 des journées Cathala-Letort de réflexion et de prospective sur l'Ingénierie Circulaire, dont l'objectif était de démontrer l'intérêt de l'ingénierie, et plus particulièrement du génie des procédés, dans la problématique de l'économie circulaire. La SFGP distingue en effet 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.

ÉCOSYSTÈMES, ENJEUX ACADÉMIQUES ET INDUSTRIELS

Écosystèmes

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.

Des programmes et plans du gouvernement lancés et encore en cours (France 2030, plan France-Nation-Verte).

Des actions de financement portées par la BPI, ainsi que par l'ADEME et l'ANR pour les programmes de recherche, en complément des actions 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'accompagnement 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.

Des outils de prospective et de réflexion proposés par des associations d'acteurs tels que l'Institut National de l'Économie Circulaire (INEC) et l'association OREE, souvent en relation avec des syndicats professionnels comme la FEDEREC (Fédération des Entreprises du Recyclage) et la FNADE (Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement).

Des éco-organismes tels que CITEO (emballages ménagers), Ecologic (déchets d'équipements électriques et électroniques), Ecosystém (équipements électriques et électroniques ménagers), Ecomaison (bâtiment), ou encore Valdelia (bâtiment).

Des pôles de compétitivité : TEAM2, AXELERA, France-Water-Team, Bioeconomy For Change et Matériaia.

Des sociétés savantes, de plus en plus impliquées sur le sujet.

Des grands organismes de recherche, soutenant des programmes spécifiques.

Enjeux académiques

Une enquête réalisée par la SFGP en 2021 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 sur l'ensemble du territoire. Ces derniers ont en commun une très grande pluridisciplinarité, un lien fort avec la notion de territoire et d'écosystèmes, ainsi qu'une association presque systématique à un ou plusieurs partenaires industriels.

Ils concernent l'ensemble des piliers de l'économie circulaire, avec des actions plus

marquées sur le recyclage, l'approvisionnement durable, l'écologie industrielle, les territoires et l'approche systémique, l'acceptabilité sociale et l'écoconception.

Par ailleurs, les **formations à l'Ingénierie Circulaire** sont en pleine croissance (nouveau master européen BIOCEB¹, master ECOD²...). Les formations existantes incluent des formations universitaires, largement axées sur les outils du génie des procédés, ainsi que des mastères spécialisés.

Enjeux industriels

La prise de conscience que les activités humaines doivent être durables est à présent très largement partagée et comprise, à la fois en raison des efforts de formation et d'information, mais aussi parce que les premiers effets du changement climatique et de la raréfaction de l'eau et des matières premières sont perceptibles à tous.

Dans nos sociétés fondées 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 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.

¹ Biological and Chemical Engineering for a sustainable Bioeconomy, avec l'implication d'enseignants-chercheurs d'AgroParisTech et de l'université de Reims-Champagne-Ardennes.

² Economie Circulaire et Organisation Durable, à Polytech Marseille.

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

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

GRANDS PRINCIPES ET EXEMPLES D'APPLICATIONS DE L'INGÉNIERIE CIRCULAIRE

Écoconceptions des procédés

L'**écoconception** vise à limiter et réduire les impacts environnementaux des procédés en tenant compte des équilibres économiques et sociaux à chaque stade du cycle de vie. Elle repose sur l'adaptation des **outils classiques des procédés et systèmes industriels aux enjeux de l'économie circulaire** (modélisation, analyse des données, optimisation à grande échelle, écologie industrielle, apprentissage automatique...).

Une **vision multi-échelle et systémique** doit également être mise en œuvre afin de

prendre en compte des modèles toujours plus complexes en termes de taille et de formulation, et représenter ainsi l'entière des systèmes étudiés.

Enfin, la production et la gestion décentralisées des ressources locales favorisant leur valorisation et la réduction des impacts environnementaux, la **question de l'interopérabilité des systèmes** doit être posée, avec comme objectif la création de nouvelles activités économiques territoriales par le biais des circuits courts, du réemploi et du recyclage.

Approvisionnement durable des ressources et recyclage

Vêtements, matériaux, verre, papier et cartons, produits chimiques... Le **recyclage** ou le **réemploi de matières et déchets** permet de réduire leur empreinte carbone et énergétique de façon notable.

De leur côté, les **ressources minérales** deviennent de plus en plus critiques. Face à cette menace, l'économie circulaire peut contribuer à réduire la pression environnementale exercée ces dernières années sur ces ressources et diminuer les risques d'approvisionnement.

Exemple de réalisation : La régénération du brome

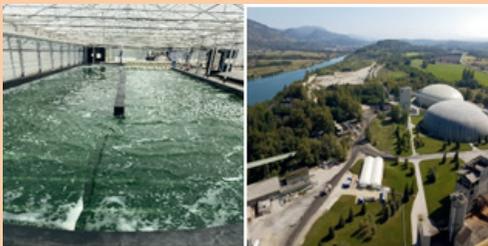


Utilisés pour fabriquer une grande variété de produits chimiques, le brome et ses dérivés sont produits à partir d'eau de mer ou de nappes souterraines, avec des impacts environnementaux et énergétiques très importants. Séché Environnement a développé, sur son site de Saint-Vulbas (Ain), une technologie alternative basée sur l'emploi de déchets riches en bromure provenant des secteurs pharmaceutiques et chimiques. Unique au monde, ce procédé repose sur la purification thermique du brome via un four statique. Il permet de récupérer plus de 99 % du brome contenu dans les déchets.

Écologie industrielle et territoriale

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.

Exemple de réalisation : Le projet CIMENTALGUE *



** Coordonné par le groupe cimentier VICAT, il inclut également le groupe Total et Nantes Université. Outre le financement de l'ADEME, il bénéficie du soutien des régions Pays de la Loire et Auvergne-Rhône-Alpes. Il est labellisé par le pôle de compétitivité Mer Bretagne Atlantique.*

La société AlgoSource Technologies développe des procédés de recyclage de CO2 d'origine industrielle par la culture de microalgues. Elle participe depuis 2019 au projet CIMENTALGUE, en vue de réaliser un démonstrateur au sein d'une cimenterie lyonnaise pour capter le CO2 de la fumée produite par la production de ciment. Le programme d'exploitation du démonstrateur (2023-2024) doit permettre de valider et d'optimiser ce concept à une échelle représentative en testant deux souches différentes de microalgues.

Autres pistes explorées par les industriels : l'**usage de la biomasse** pour remplacer des produits fossiles ou pétrosourcés par des produits biosourcés, ainsi que la **valorisation des biodéchets sur un territoire**. Cette dernière pose cependant plusieurs défis concernant le génie des procédés, et notamment le développement de procédés flexibles ou adaptatifs.

Exemple de réalisation : Le projet iDEES *

Ce projet vise à développer un outil d'aide à la décision pour le choix d'un scénario durable de gestion des matières résiduelles organiques sur un territoire (schématiquement : tri à la source sans collecte et microprocédés de valorisation individuelle ou de quartier vs tri à la source avec collecte et procédés de valorisation industriels).

Cet outil doit adapter les méthodologies d'évaluation environnementale, économique et sociale au contexte de la gestion des matières résiduelles organiques. Il pourrait ensuite être appliqué à d'autres secteurs d'activités comme le recyclage des matières plastiques, la production de matières et d'énergies biosourcées, etc.

** Intégration des Dimensions Environnementales, Économiques et Sociales dans une logique d'économie circulaire. Projet (2023-2025) financé par la 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).*

Allongement de la durée d'usage

L'allongement de la durée d'usage de certains équipements via le **réemploi, la réutilisation ou la réparation** peut contribuer à la préservation des ressources et à la réduction des déchets sans recourir à des procédés coûteux et complexes tels que le recyclage.

C'est le cas des batteries Li-ion employées pour la mobilité électrique, qui sont retirées des véhicules électriques à 80 % de leur capacité initiale. Elles peuvent alors être utilisées à d'autres fins, en tant que batteries de seconde vie en stockage stationnaire jusqu'à 50 % à 60 % de leur capacité initiale. À condition toutefois de **maîtriser les risques** liés à l'extraction de la batterie, à l'évaluation de son état de santé, à son stockage, à son transport et à ses utilisations de seconde vie.

Exemple de réalisation : Le projet SafeLiBatt *

L'objectif de ce projet est de produire une base scientifique pour le développement sûr et durable de batteries de seconde vie. Il doit identifier les risques en cas de défaillance et d'emballage thermique des batteries de première et seconde vie, évaluer les impacts environnementaux et socio-économiques, proposer des mesures de gestion intégrée des risques et développer des protocoles de test sur les cellules de seconde vie.

** Safety concerns and opportunities related to advanced materials and new technologies in energy production and storage. 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).*

Décarbonation et CO2

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 et la plupart intéressent le génie des procédés : développement de nouveaux procédés minimisant les émissions de CO2, création d'outils de modélisation et de simulation, traitement des effluents (notamment par captage du CO2), nouveaux indicateurs de suivi, de performance et de gestion des procédés industriels, renforcement du rôle des analyses de cycle de vie et des critères d'éco-conditionnalité.

Enfin, parce que la consommation de matière, d'énergie et de chaleur est inhérente aux processus industriels, trois principaux leviers sont à activer simultanément ou progressivement pour décarboner l'activité industrielle :

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

Énergie

À la différence des grandes ressources matières, l'énergie n'est pas « circulaire » et son rejet est inévitable. L'un de ses devenir, dans le cadre de l'économie circulaire, est de fermer la boucle lorsque la recirculation des déchets en matière ne peut pas être effectuée (conversion en énergie).

Eau

Le concept d'économie circulaire s'étend à l'eau et à ses usages, qu'ils soient agricoles, industriels, domestiques ou urbains. Le **traitement des eaux usées et des boues**, au travers notamment des stations d'épuration, est au cœur de cet enjeu.

Or, 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 :

- prendre en compte, dès la conception du projet, des critères de qualité spécifiques des eaux traitées pour pouvoir les réutiliser ;
- développer des procédés de traitement ciblant les polluants dits émergents (produits chimiques, médicaments, nanoparticules, microplastiques...);
- réduire, voire inverser, l'empreinte énergétique des stations d'épuration, en maximisant notamment les récupérations de chaleur et les productions d'énergie à partir des boues ;
- définir l'échelle pertinente pour chaque procédé ;
- réduire l'empreinte carbone des stations d'épuration par la mise au point de matériaux locaux et low cost pour le traitement des eaux usées.

Mais cette utilisation ne doit être actionnée qu'en dernier recours. Une alternative intéressante est le **traitement thermique** en vue de la production d'un vecteur énergétique intermédiaire.

Les **énergies renouvelables** sont également pleinement associées à l'Ingénierie Circulaire. Leur développement pose toutefois de nouveaux défis, comme ceux du stockage et du transport.

Enfin, le génie des procédés doit jouer un rôle d'intégration des diverses connaissances pour mettre en place différents scénarios d'évolution des systèmes énergétiques, et surtout quantifier et qualifier les solutions proposées par des indicateurs fiables et indiscutables.

Agro-industries

L'Ingénierie Circulaire dans les agro-industries vise à **utiliser efficacement et durablement toutes les ressources** (matières premières, ressources animales et végétales, eau et énergie) de façon à fournir une production alimentaire et non alimentaire de qualité et en quantité suffisante, tout en préservant et en régénérant les écosystèmes.

Elle passe notamment par le recours accru au **recyclage** et au **réemploi** (alimentation animale, production d'énergie, transformation des biodéchets en fertilisants ou en molécules pour la chimie biosourcée...), le **tri sélectif** ou encore l'usage de la **biomasse**. Le recours à cette dernière doit cependant se faire sans concurrence avec l'alimentation, sans accroître l'utilisation d'intrants (souvent carbonés) et d'eau, et en préservant la biodiversité, l'adaptation aux changements climatiques et l'introduction des nouvelles pratiques agricoles et agronomiques.

Exemple de réalisation :

Le projet MINIMEAU *

Le traitement et la gestion des effluents présents dans les eaux rejetées par les activités agroalimentaires représentent parfois une charge lourde pour l'industriel et une perte de matière première non négligeable. Le projet MINIMEAU a mis au point plusieurs logiciels pour l'écoconception des réseaux d'eau (aide à la décision, étude et simulation de procédés innovants de traitement, analyse environnementale des scénarios d'amélioration), incluant la possibilité de recycler les eaux peu chargées ou les effluents aqueux après un traitement adéquat de purification. Les études effectuées dans le cadre du projet ont montré des potentiels de réduction de la consommation d'eau de l'ordre de 30 %.

** Minimisation des consommations d'eau dans les agro-industries par le développement d'une approche intégrée associant Empreinte Eau et Pinch massique. Projet ANR d'une durée de 4 ans (2018-2021) labellisé par le pôle de compétitivité HYDREOS, associant des partenaires académiques (AgroParisTech/UMR GENIAL, IRSTEA/UMR ITAP), un industriel (ProSim), plusieurs centres techniques (CTCPA, ITERG, ACTALIA, IFV) et un centre de transfert (CRITT Paca).*

L'écoconception dans les systèmes agricoles et agro-industriels s'applique en premier lieu aux systèmes de production, mais on peut également l'appliquer à l'ensemble produit-emballage.

De son côté, **l'écologie industrielle et territoriale** vise à créer des symbioses entre différentes activités humaines pour fonctionner comme un système écologique. À l'échelle d'un territoire, il s'agit de permettre des boucles d'échanges de ressources pour une gestion optimisée.

RECOMMANDATIONS

Les recommandations de la SFGP 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 cycles 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 de 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) et d'énergie et le stockage du carbone dans la mise en œuvre des procédés ;

Développer des procédés propres, efficaces et sûrs sur le concept de solutions fondées sur la nature ;

Intégrer tous les concepts d'Ingénierie Circulaire au plus tôt dans les programmes de formations de techniciens et d'ingénieurs en génie des procédés.

LA SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

La SFGP fédère tous les acteurs en génie des procédés en France.

La Société Française de Génie des Procédés (SFGP) est une association loi 1901. Elle rassemble ingénieurs, techniciens, enseignants et chercheurs en vue de promouvoir le génie des procédés dans les industries chimiques, pétrolières, pharmaceutiques, biotechnologiques, agroalimentaires, papetières et cimentières, les industries « écotecnologiques » (traitements de l'air, de l'eau et des déchets). Sa finalité est de contribuer au développement des industries de procédés en France.

La SFGP a pour missions principales de :

- Contribuer à la réflexion nationale sur les grands défis : nouvelle France industrielle, transition énergétique et écologique, bioéconomie, usine du futur... ;
- Répondre aux problématiques techniques des industriels et les faire bénéficier d'un réseau d'experts ;
- Être un lieu d'échange et de réflexion pour tous les professionnels concernés par le génie des procédés.

La SFGP dispose d'un conseil d'administration de 30 membres représentant les industries, les écoles d'ingénieurs, les universités, les EPIC, les EPST et les associations professionnelles.

Ses groupes thématiques contribuent aux progrès scientifiques et technologiques dans le champ du génie des procédés en organisant des journées d'étude et de prospective, des webinaires ainsi que des colloques, et en participant au congrès national bisannuel de la SFGP.

La SFGP est très active au sein de l'organisation européenne European Federation of Chemical Engineering (EFCE) et participe au World Chemical Engineering Council (WCEC). Elle coopère avec d'autres sociétés savantes (Association des Chimistes Ingénieurs et Cadres des Industries Agricoles et Alimentaires, Association Française de Mécanique, Groupe Français des Polymères, Société Française de Chimie, Société Française des Matériaux, Société Française de Thermique) dont les domaines d'action touchent au génie des procédés ainsi qu'avec les pôles de compétitivité tel que Axelera.

Cette synthèse du Livre Blanc sur l'Ingénierie Circulaire* a été préparée par :

- Catherine BONAZZI, AgroParisTech-INRAE, Secrétaire Générale de la SFGP
- Pierre KIENER, Michelin, Vice-Président industriel de la SFGP
- Jack LEGRAND, GEPEA Université de Nantes
- Patrice MEHEUX, Trésorier de la SFGP
- François NICOL, Veolia, Président de la SFGP
- Martine POUX, LGC Toulouse INP-ENSIACET, Déléguée Générale de la SFGP
- Nicolas ROCHE, CEREGE Université d'Aix-Marseille, Vice-Président académique de la SFGP

* La version intégrale du Livre Blanc est consultable sur www.sfgp.asso.fr

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 : 978-2-910239-89-3