

SYMBIOSES INDUSTRIELLES ET ECONOMIE CIRCULAIRE AU SERVICE DE LA CAUSE CLIMATIQUE, LE BASCULEMENT VERS INDUSTRIE 6.0

Arnaud DIEMER, Florian DIERICKX

Revue Francophone du Développement Durable

2022 - n°19 - Mars

Pages 83 - 104

ISSN 2269-1464

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://erasme.uca.fr/publications/revue-francophone-du-developpement-durable/>

Pour citer cet article

Diemer A., Dierickx F. (2022), Symbioses industrielles et économie circulaire au service de la cause climatique, le basculement vers Industrie 6.0. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°19, mars, p. 83 - 104.

Symbioses industrielles et Economie circulaire au service de la cause climatique, le basculement vers Industrie 6.0

Arnaud DIEMER, Florian DIERICKX

Université Clermont Auvergne, CERDI
Centre d'Excellence Jean Monnet sur le Développement Durable (ERASME),
Chaire Jean Monnet d'Economie Circulaire et d'Ecologie Industrielle

Résumé : Les symbioses et l'économie circulaire sont de plus en plus analysées de concert. Dans les faits, les symbioses sont présentées comme des formes organisationnelles susceptibles de générer des bénéfices économiques et environnementaux dans des systèmes circulaires de plus en plus complexes. Or, depuis quelques années, sous l'influence du changement climatique, des politiques de décarbonation (élimination des déchets et de la pollution émanant des gaz à effet de serre, stockage du carbone) et d'investissements massifs dans les énergies renouvelables, les symbioses sont l'expression d'une réponse collective visant à inscrire la production et la consommation dans une logique de durabilité forte. L'industrie 6.0 marque ainsi une nouvelle étape dans l'histoire de l'industrie. Elle redéfinit les piliers de l'économie circulaire dans un cadre de limites planétaires et de plancher social. La dynamique industrielle qui en résulte, part de la réévaluation des besoins (et des biens offerts) et de la relocalisation des chaînes de valeur, afin de formuler de nouvelles réorganisations industrielles. Les symbioses sont ces entités qui prônent une démarche collaborative pour réduire nos extractions de matières premières, et du même coup les émissions de GES qui sont liées à de telles actions.

Mots Clés : Chaîne de valeurs, Durabilité forte, Economie circulaire, Michelin, Symbioses

Introduction

La notion d'écologie industrielle a été définie en 1989, dans un numéro spécial de la revue *Scientific American* consacré à la gestion de la planète Terre. Dans un article intitulé *Des Stratégies industrielles viables*, Robert Frosch et Nicolas Gallopoulos, tous deux responsables de la Recherche chez General Motors, avancent l'idée selon laquelle il devient nécessaire de recycler les biens usagés, d'économiser les ressources et de rechercher des matières premières de remplacement. L'accumulation des déchets et la pollution générée par le progrès technique les conduisent à remettre en cause le modèle de développement des économies industrielles et à formuler la notion d'écosystème industriel. En l'espace d'une trentaine d'années, le courant de l'écologie industrielle s'est structuré autour de plusieurs champs de recherche (Labrune, Diemer, 2007). En s'inspirant des écosystèmes et des espèces biologiques, l'écologie industrielle a permis de repenser les relations industrielles au sein d'un territoire (Buclet, 2011). Les symbioses industrielles témoignent de cet engouement pour les synergies et les interactions entre différentes organisations (Domenech & al., 2019). Basée sur le concept d'échanges symbiotiques biophysiques, la symbiose industrielle engage " des entités distinctes dans une approche collective visant à tirer parti d'un avantage concurrentiel

impliquant l'échange physique de matériaux, d'énergie, d'eau et de sous-produits " (Chertow, 2004). En travaillant ensemble, les entreprises s'efforcent de proposer une prestation collective supérieure à la somme des bénéfiques individuels qui pourrait être obtenue dans le cas d'actions indépendantes (Chertow, 2007 ; Baas, Boons, 2004). Dans le cas des déchets, les symbioses ont permis de reconsidérer bon nombre de stratégies industrielles. Les déchets sont passés du stade de résidus indésirables du processus de production, à celui de coproduits pouvant être réintégrés localement en tant que ressources dans d'autres processus de production (Morales & al., 2019 ; Cettei, 2013). De ce fait, les symbioses industrielles ouvrent la voie à deux types de réflexion (Diemer, 2013).

D'une part, elles illustrent la nécessaire interdépendance entre plusieurs processus de production de différentes firmes et le bouclage des flux d'énergie et de matière à mettre en œuvre à l'intérieur d'une zone d'activité industrielle territorialisée (Nielsen, 2007). Ainsi, une chaîne de valeur associée à des boucles fermées et étendues (Baldassarre & al., 2019 ; Blomsma, 2018), renforce et améliore la circularité des flux et des matières au sein d'une symbiose industrielle (Chertow, 2007, Baas, Boons, 2004, Taddeo & al., 2017). La chaîne de valeur se compose de chaînes d'approvisionnement (supply chain) interconnectées, susceptibles de résister à un choc ou à une série de perturbations tout en sécurisant les ventes et les marchés (demand chain) dans un environnement changeant (Holling, 1973). On peut comprendre ici que les symbioses constituent des objets d'expérimentation pour la mise en place d'une économie circulaire (Saavedra & al., 2018). Les chaînes de valeur qui se développent au sein de l'économie circulaire intègrent des sous-produits dans les différentes boucles du système (Lawal & al., 2021), ce qui permet une gestion durable des ressources dans la chaîne d'approvisionnement (D'Amato & al., 2017).

D'autre part, elles marquent l'avènement d'un nouveau modèle d'organisation industrielle que nous qualifierons de durabilité forte (Diemer, Morales, 2016 ; Diemer, 2016). Cette durabilité forte s'exprime au travers de quatre postulats : l'éco-efficacité, la collaboration, la proximité et la résilience. *L'éco-efficacité* cherche à optimiser les flux de matières et d'énergie via l'étude du métabolisme industriel au regard d'un objectif environnemental précis (réduire ses déchets ou ses émissions de gaz à effet de serre). *La collaboration* traduit les efforts des parties prenantes pour intensifier la circularité (si la symbiose s'inscrit bien dans une logique marchande, la création de valeur s'appuie sur des synergies entre les acteurs qui préfèrent collaborer plutôt que se concurrencer). *La proximité* renforce le bouclage des flux biophysiques et la communication (Beaurain, Brullot, 2011) entre différentes organisations (les relations symbiotiques s'expriment à la fois en termes de distance spatiale - chercher un sous-traitant proche de son lieu de production - et de distance psychologique - confiance dans ses partenaires). *La résilience* inscrit les relations industrielles ainsi que le bouclage des flux biophysiques et socioéconomiques dans la durée. La résilience de la symbiose industrielle se mesure ici par sa capacité à résister aux chocs exogènes (perturbation venant d'une hausse du

prix de l'énergie) et endogènes (retrait d'une entreprise membre du réseau). La symbiose serait ainsi capable d'absorber les chocs, sans changer de structure, de comportement ou de processus de régulation. Cette durabilité forte n'a cependant rien d'un long fleuve tranquille, les postulats d'éco-efficacité et de résilience peuvent très vite générer des situations antinomiques. En effet, lorsque les industriels décident d'optimiser leurs flux d'énergie, de matière ou de déchets, ceci peut porter préjudice à la résilience collective de la symbiose (Diemer, 2015). Une réduction des déchets organiques, valorisés sous la forme d'énergie, peut remettre en cause le modèle économique de la symbiose.

Revue de littérature des symbioses industrielles

Dans sa forme initiale, la symbiose industrielle a été proposée pour décrire les relations d'échanges de produits entre plusieurs entreprises, situées près de la ville danoise de Kalundborg (Ehrenfeld, Chertow, 2002). La symbiose de Kalundborg est très vite devenue une *success story*, déclenchant du même coup, une profusion d'études de cas à l'échelle mondiale. On peut citer la symbiose du groupe Guitang en Chine (industrie du sucre et de la pâte à papier), la symbiose de Kwinana en Australie (industrie minière), la symbiose urbaine et industrielle (Eco-town) au Japon, la symbiose de Norrköping en Suède (biofuels, biogaz et fertilisants), la symbiose de Kouvola en Finlande (industrie du bois et de la pâte à papier), la symbiose de Dunkerque en France (autour d'Arcelor-Mittal) ou encore la symbiose Pomacle-Bazancourt en France (bioraffinerie). Au-delà des spécificités de chacune des symbioses citées, les recherches ont principalement porté sur les conditions d'émergence de ces symbioses (Taddeo & al., 2017 ; Junqua, Brulot, 2015). Quatre processus ont été identifiés :

(1) *l'auto-organisation* (c'est une approche ascendante résultant d'une interaction directe entre les acteurs industriels, sans coordination externe). L'expertise réside dans les organisations disposant de ressources et d'opportunités (Chertow, Ehrenfeld, 2012, Labrune, Diemer, 2007).

(2) *La présence d'un facilitateur* qui coordonne les activités, travaille avec les différentes parties prenantes pour identifier les opportunités et les aider à concrétiser leurs projets (Sodergren, Palm, 2021 ; Buclet, 2011).

(3) *Le soutien des technologies de l'information et la communication* (Diemer, 2012, Diemer, Dannequin, 2009), les activités de la symbiose s'appuient sur la collecte et la gestion de données (via la conception d'un logiciel) sur la disponibilité des ressources et les synergies potentielles (Livre blanc, 2016). On peut citer l'outil *Toile maker* (Wojtkowski, 2019) susceptible de générer une toile industrielle, une toile de l'énergie ou encore une toile de l'alimentation.

(4) *la vision stratégique ou planifiée* (c'est une approche descendante dans laquelle les réseaux sont formés en suivant un plan ou une vision centrale, qui attire de nouvelles

entreprises sur le site (constitution de la symbiose au fil du temps) ou proposent de nouveaux projets (Domenech, Davies, 2011).

Depuis quelques années, la symbiose a généré un autre type de littérature, focalisé sur les défis à relever en matière de chaînes d'approvisionnement, notamment dans une perspective systémique et d'économie circulaire (Saavedra & al., 2018). L'analyse de la chaîne d'approvisionnement des symbioses industrielles est indispensable pour expliquer la dynamique du système local. Le concept de chaîne de valeur locale suppose des chaînes d'approvisionnement interconnectées (souvent en cascades), vouées à sécuriser la fourniture de biens et de services à la société tout en prenant en compte l'analyse du cycle de vie des produits.

Les symbioses de Kalundborg et de Pomacle-Bazancourt

Les principales études sur les symbioses industrielles se sont concentrées sur les synergies potentielles en matière de déchets et de coproduits (Onita & al., 2006), à ce titre la symbiose de Kalundborg au Danemark et celle de la bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt en France, sont aujourd'hui décrits comme des cas d'école.

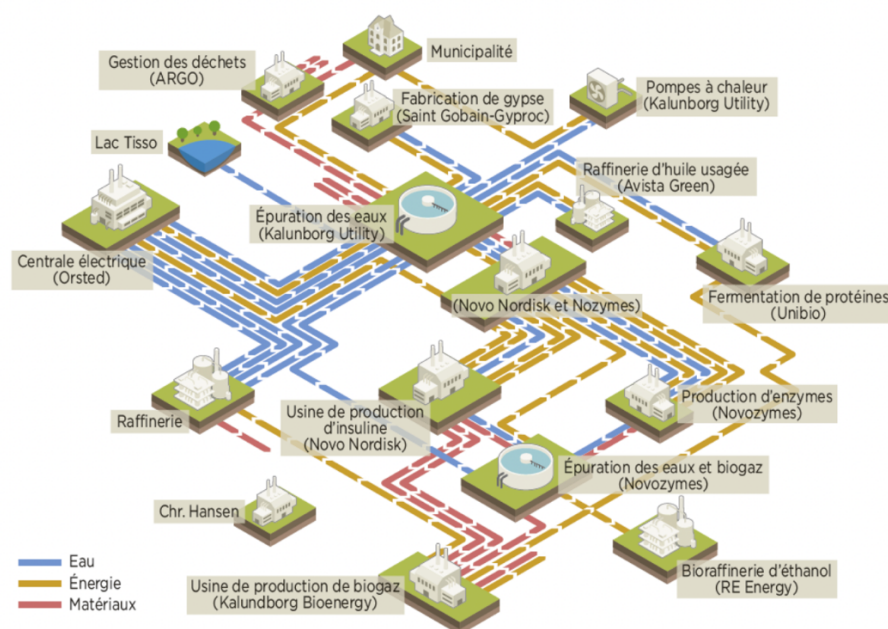
La symbiose industrielle de Kalundborg au Danemark

Au vu du nombre d'articles parus à ce jour, la symbiose industrielle de Kalundborg constitue l'une des plus belles vitrines de l'écologie industrielle (Diemer, Morales, 2022 ; Neves & al., 2020). Les relations symbiotiques ont émergé de manière spontanée et créé différentes formes de coordination (Diemer, 2013). Trois possibilités d'échanges de ressources ont été prises en compte : (1) la réutilisation de produits ; (2) le partage d'infrastructures ; (3) la fourniture conjointe de services. Ainsi, la symbiose industrielle met l'accent sur les stratégies inter-entreprises tout en renvoyant à un ensemble de terminologies telles que l'écosystème industriel, les îlots de soutenabilité ou encore les parcs éco-industriels. Les entreprises faisant partie de la symbiose sont liées par des échanges de déchets, d'eau, de vapeur, de chaleur, ou d'autres formes d'énergie résiduelle, sur la base d'une dépendance contractuelle mutualisée. Le développement de la symbiose industrielle à Kalundborg a été décrit comme un processus évolutif dans lequel un certain nombre d'échanges indépendants de sous-produits (eau, chaleur, vapeur, déchets...) se sont progressivement transformés en un réseau complexe d'interactions symbiotiques entre cinq entreprises. Dans la Figure 1, on peut observer que les entreprises faisant partie de la symbiose sont Gyroc, qui produit des panneaux de plâtre ; Aesnae, producteur d'électricité et de chaleur ; Statoil, producteur de combustibles et d'autres dérivés du pétrole ; Novo Nordisk, producteur d'insuline et d'enzymes ; Noveren, société de traitement des déchets et finalement la municipalité de la ville de Kalundborg. Le succès des échanges symbiotiques dépend grandement du contexte historique et des perspectives dans lesquelles les ententes inter-entreprises sont envisagées. Dès lors, la symbiose industrielle n'est pas considérée comme une

solution environnementale isolée, mais plutôt comme faisant partie d'un processus d'amélioration de la performance des entreprises individuelles ainsi que de l'entité collective (Diemer, 2015, Labrune & Diemer, 2007 ; Ehrenfeld, Chertow, 2002).

Cinq facteurs contribuent à la construction de la symbiose industrielle comme un objet collectif, c'est à ce titre, qu'elle constitue une véritable innovation sociale dans cette *success story* : (1) une collaboration entre des partenaires qui ont des activités différentes ; (2) l'importance d'une solution marchande (solution win win qui revient à donner une valeur interne au déchet) ; (3) la proximité géographique entre les participants (c'est le champ de l'écologie industrielle et territoriale) ; (4) la volonté de travailler ensemble (forte complicité entre les responsables des différentes entreprises) et de partager des valeurs (confiance) ; (5) une bonne communication entre les différents acteurs (les managers ont l'habitude de se rencontrer au Rotary Club).

Figure 1 : Représentation de la symbiose industrielle de Kalundborg



Source : Diemer & Morales (2022)

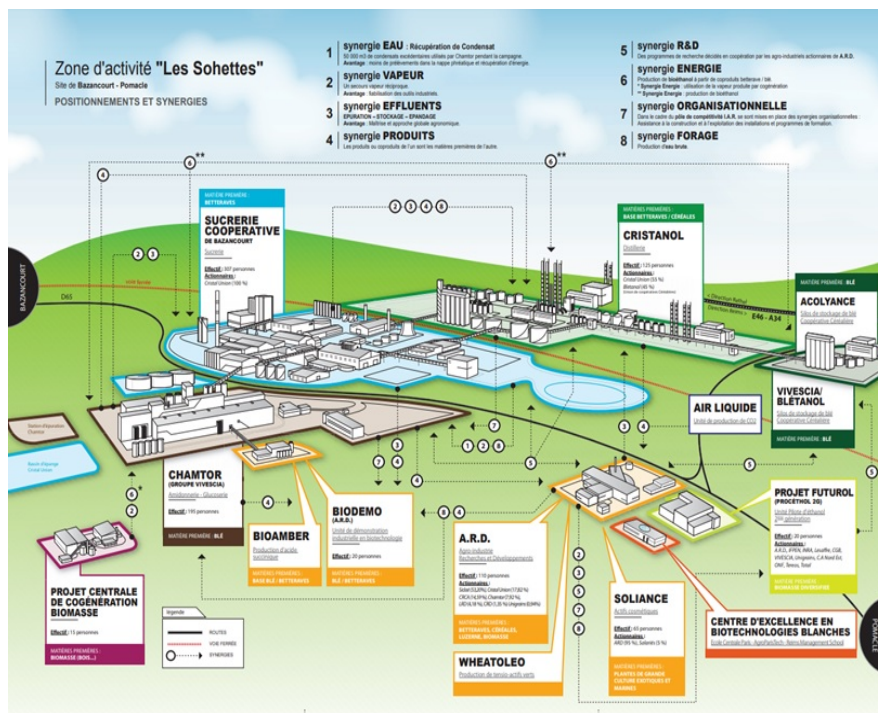
La symbiose industrielle de Pomacle-Bazancourt en France

La symbiose industrielle de Pomacle-Bazancourt s'inscrit dans une littérature consacrée aux bioraffineries (Santos, Magrini, 2019). Il s'agit d'une organisation à l'échelle territoriale (Morales, Befort, Diemer, 2019) qui offre différentes options technologiques pour gérer les biodéchets tels que la méthanisation, le compostage, la micro-méthanisation et d'autres procédés innovants (bio-électrosynthèse ou les microalgues). La principale source d'intrants pour les symbioses industrielles dans les bioraffineries est la biomasse (produits ou résidus destinés à l'alimentation humaine et animale) et d'autres coproduits (le CO₂, la vinasse et le sirop de faible pureté). Ces intrants sont échangés au sein des entreprises de proximité, ce qui déclenche

l'intégration de la chaîne d'approvisionnement (Bouteiller, Thenot, Lescieux-Katir, 2018). Cette symbiose industrielle se présente sous la forme de chaînes de valeur circulaires (gestion de l'approvisionnement en boucles fermées et relations de synergie) cherchant à utiliser la biomasse sur l'ensemble de son cycle de vie (de la récolte aux déchets). La plupart des bioraffineries se sont développées autour des caractéristiques suivantes : (i) un minimum de trois entités différentes échangent au moins deux ressources ; (ii) ces entités échangent selon le principe de la coopération et cherchent à améliorer l'efficacité du système (c'est un objectif commun) ; (iii) elles obéissent à réglementations tout en partageant certaines valeurs (au sein de la symbiose) ; (iv) elles sont très sensibles aux chocs externes. La Bioraffinerie Pomacle-Bazancourt permet de cerner les contours d'une symbiose industrielle et territoriale, notamment dans sa quête de bouclage des flux et de création de valeur dans le secteur de la betterave sucrière (Cristal Union, 2018).

Les bioraffineries sont au cœur de la bioéconomie (Bennich & al., 2021 ; Thenot & al., 2017), ce nouveau champ représente près de 936.000 emplois pour un chiffre d'affaires total de 78,4 milliards d'euros. Les chaînes de valeur agro-industrielles dans cette région sont influencées par les décisions d'allocation de la biomasse et les synergies sous-jacentes entre les acteurs locaux. La Figure 2 montre la structure de la bioraffinerie Pomacle-Bazancourt, composée de 10 acteurs : Vivescia / Bletanol, Cristal Union, Cristanol, Chamtor, Givaudan Active Beauty, Wheatoleo, Air Liquide, Européenne de biomasse, le Centre de recherche industrielle (ARD), et le Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB).

Figure 2 : Représentation de la symbiose industrielle de bioraffinerie Pomacle-Bazancourt



Source : Rapport ARD (2015)

Les betteraves sucrières - dans l'écosystème agro-industriel de la bioraffinerie Pomacle-Bazancour - sont cultivées sur près de 23.438 hectares (ha), soit environ 67 % des surfaces agricoles appartenant aux agriculteurs de Cristal Union. Cela représente 2,25 millions de tonnes de betteraves produites et transformées sur place. Dans cette symbiose industrielle, le jus de sucre et les sirops sont transformés en sucre, alcool et bioéthanol à travers un processus de cristallisation ou distillation. Les sous-produits obtenus sont la vinasse, le sirop de faible qualité issu de la cristallisation et le CO₂ issu de la distillation et de la cristallisation de la biomasse de betterave sucrière. Le processus de production dans la bioraffinerie boucle le sirop de faible pureté et le distille en alcool ou en bioéthanol. Le CO₂ est utilisé pour gazéifier les boissons ; la pulpe de la betterave va directement dans l'alimentation animale ; les écumes issues de la production de sirop ainsi que les vinasses sont réutilisées comme engrais. La vinasse représente un bio-engrais de grande valeur offrant des avantages environnementaux et économiques.

Les symbioses industrielles et les chaînes de valeur

Malgré quelques succès sur l'échiquier international (la symbiose industrielle de Dunkerque en France, la symbiose industrielle du groupe Guitang en Chine...), les symbioses industrielles peinent encore à trouver leur rythme de croisière. Le défi consiste à s'attaquer à tous les obstacles, qu'ils soient technologiques, socio-économiques ou environnementaux (Golev, Corder, Giurco, 2014). L'exploitation totale du potentiel d'une symbiose industrielle réside principalement dans la prise en compte des conséquences pour les réseaux énergétiques et les infrastructures s'y rattachant dans les chaînes de valeurs symbiotiques impliquant de multiples secteurs industriels et des environnements complexes (Herczeg & al., 2018). Des exemples d'activités d'innovation symbiotique dans les chaînes de valeur sont la récupération de la chaleur résiduelle par le chauffage urbain, l'intégration de la chaleur dans les procédés chimiques, la transformation des déchets organiques en énergie via la méthanisation, et l'incorporation des déchets verts aux eaux usées. Dès lors, les champs qu'il convient d'explorer (Turken & al., 2020), peuvent prendre plusieurs formes :

(i) les symbioses de taille importante, articulant l'échelle locale et régionale, combinant la prise en compte des infrastructures, les missions et la montée en responsabilités des collectivités territoriales et les réseaux énergétiques, y compris la mise en place d'une production décentralisée et le rôle que la symbiose peut jouer dans les réseaux énergétiques fluctuant. Les éléments d'infrastructures interagissent entre eux : la gestion des déchets, de l'eau, des réseaux de gaz, la responsabilité des collectivités dans la mise en place des Plans Climat Air Énergie Territoriaux (PCAET) et des principes de l'économie circulaire ; le réseau énergétique inclut l'intégration du chauffage urbain et la planification intelligente des opérations.

(ii) la gestion des flux secondaires (c'est le cas du tri ou de la collecte des déchets) notamment lorsqu'il s'agit de les utiliser comme ressource pour d'autres usines et entreprises, dans différents secteurs et/ou chaînes de valeur.

(iii) la reconceptualisation du processus de production existant de manière à inclure différents couplages (couple énergie - matière, couple déchet - eau, couple infrastructure - logistique...) et renforcer les bienfaits de la symbiose industrielle.

(iv) l'intégration des technologies de l'information, y compris l'intelligence artificielle, pour la conception et des technologies opérationnelles pour la prise de décision multicritères. Parmi les technologies opérationnelles pour la prise de décision on trouve la gestion des flux d'échanges dans un environnement de production dynamique, ainsi comme la modélisation avancée de nouvelles interactions symbiotiques entre les différents acteurs d'un territoire à travers une carte des acteurs ou encore pour le partage des données pour des symbioses au sein d'une plateforme *open data*.

(v) le développement des méthodologies d'évaluation et de conception d'indicateurs clés pour mesurer la performance de la symbiose, y compris des études d'impacts environnementaux, économiques et sociaux. L'analyse du cycle de vie et l'estimation du coût du cycle de vie pourraient ainsi constituer des normes de durabilité au service des relations symbiotiques.

Il est indéniable que notre connaissance des symbioses s'étoffe à la vue d'un inventaire des relations symbiotiques, des solutions réussies ainsi que des meilleures pratiques. Plus encore, les aspects non technologiques, qui peuvent inclure à la fois, des questions réglementaires, la définition de normes, la mise en place de nouveaux modèles économiques, la gestion équitable des bénéfices ou l'élaboration de stratégies collaboratives par le biais de contrats ou de plateformes d'échanges doivent être prise en compte.

Les symbioses industrielles au coeur des enjeux économiques, industriels et climatiques

Si les symbioses industrielles s'apparentent à des formes d'organisation de la méso-économie (échelle du territoire, groupe d'acteurs), leur succès les prédisposent à relever un certain nombre d'enjeux, notamment le passage à l'économie circulaire, à l'industrie 6.0 ou encore à constituer une réponse au changement climatique.

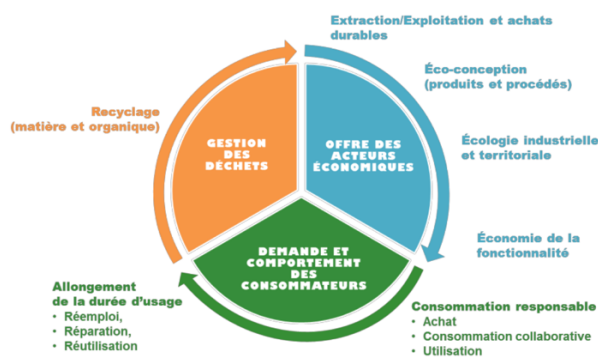
Les symbioses industrielles au service de l'économie circulaire

Au fil du temps, les symbioses sont devenues des formes d'organisation, qui ont cherché à conjuguer les grands principes de l'écologie et les enseignements de l'économie industrielle (Diemer, 2016). Il s'agissait, d'une part, de décrire le métabolisme industriel afin de cerner la nature même des flux de matières et d'énergie

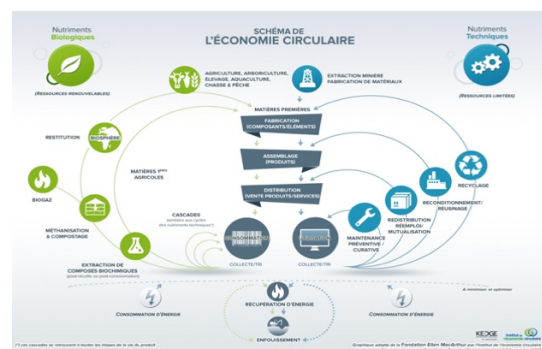
qui se cachent derrière les fonctions de production et de consommation, et d'autre part, de mobiliser des outils de l'écologie industrielle mettant en lumière l'efficacité du dispositif, ou encore de comprendre la dynamique sociale susceptible de rendre compte de la stratégie organisationnelle au niveau inter-entreprises. Si ces approches ont permis de mieux appréhender le processus d'émergence de la symbiose, de mesurer les bénéfices économiques et environnementaux d'une telle approche (Wolf, Karlsson, 2008), ou encore d'identifier les contraintes et opportunités d'une stratégie inter-entreprises (Li & Gao, 2013), elles présentent le grand inconvénient de réduire la symbiose à sa plus simple expression, celle d'une organisation collective construite sur des synergies et au profit de ces seules synergies (Notarnicola & al., 2016). Or la symbiose offre d'énormes possibilités en matière d'efficacité énergétique et de consommation de matières premières. Elle serait même au cœur de la transition vers une économie circulaire (Diemer, Torres, 2020), en recyclant les déchets, en mobilisant les énergies renouvelables, en réduisant les postes de chaleur perdue et les émissions de gaz à effet de serre (Yu & al., 2021).

Placer les symbioses au cœur de l'économie circulaire est déjà une réalité en soi au vu de la représentation de l'économie circulaire proposée par le Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (2016). Les trois domaines (offre des acteurs économiques, demandes et comportements des consommateurs, gestion des déchets) conjugués aux 7 piliers (extraction, écoconception, écologie industrielle et territoriale, économie de la fonctionnalité, consommation responsable, allongement de la durée d'usage, recyclage) font des symbioses et des parcs éco-industriels, des formes d'organisation susceptibles (i) de générer des innovations techniques (Taddeo & al., 2017), notamment des processus de production en cascades destinés à échanger des déchets, des ressources et de l'énergie, (ii) d'engager une dynamique collaborative (Diemer, Morales, 2016) visant à identifier les parties prenantes et à poser les bases d'une démarche SWOT (Iacondini & al., 2014) (iii) de définir les stratégies adéquates permettant à la fois d'éliminer et de valoriser les déchets et les coproduits (Paquin, 2013).

Figure 3 : Les symbioses au cœur des représentations de l'économie circulaire



Source : MEEM (2016)



Source : Fondation Ellen Mc Arthur (2015)

Par leur nature, les symbioses sont capables de générer de l'impact collectif pour réduire l'utilisation des ressources naturelles (et donc agir sur le pilier extraction) et proposer des solutions mobilisant les énergies renouvelables (biomasse, méthanisation...). De ce fait, elles s'insèrent également bien dans le schéma de l'économie circulaire proposé par la Fondation Ellen Mc Arthur (2015).

Dès lors, si l'économie circulaire se présente comme un changement de paradigme (Diemer, Dierickx, 2020) – c'est le passage d'une gestion linéaire à une vision circulaire des déchets - les symbioses industrielles introduisent une véritable révolution managériale (Meneghetti, Nardin, 2012), puisqu'il s'agit, ni plus ni moins que de développer sa communication interne et externe (Van Capelleveen, Amrit, Yazan, 2018), de se tourner vers les acteurs de proximité et des secteurs différents pour générer une création de valeur ou une baisse des coûts (Debladis & al., 2019).

Dans le cadre de la mobilité, la Société Michelin a cherché à réduire son impact sur les ressources naturelles (matières premières, énergie, eau), et ce tout au long du cycle de vie du pneumatique (Aimon, Panier, 2014), via le modèle de 4 R (Réduire, Réutiliser, Recycler et Renouveler). L'enjeu est simple : réduire son empreinte environnementale sans dégrader la performance du produit. En effet, le pneumatique est un concentré de technologies, répondant à des qualités souvent contradictoires (bonne tenue de route par tous les temps, comportement au freinage en lignes droites ou dans les courbes, longévité du pneu, consommation de carburants, empreinte carbone...). *Réduire* introduit la question de la quantité de matières premières consommées, soit près de 4 millions de tonnes de matières par an... Une simple réduction d'un pourcent (soit 40 000 t) doit se matérialiser sous la forme d'un indicateur (ici, le Sustainable Materials Rate, SMR) et permettre à Michelin d'envisager que toutes les matières utilisées pour la production d'un pneu soient à 100% durables à l'horizon 2050. *Réutiliser* renvoie à la technique du rechapage, cette dernière consiste à rentabiliser la carcasse d'un pneu en lui donnant une nouvelle vie. Cette pratique offre des avantages à la fois écologiques (les carcasses de pneus peuvent être réutiliser 4 fois, ce qui réduit les déchets pneumatiques) et économiques (l'achat d'un pneu rechapé revient à environ 30% moins cher que l'achat d'un pneu neuf). *Recycler* repose sur la loi du 24 décembre 2022 relatif à l'élimination des pneumatiques usagés. Elle stipule l'interdiction d'abandonner ou de brûler des pneus dans la nature ou même une décharge, l'obligation pour les distributeurs de reprendre gratuitement les pneus usagés dans la limite des tonnages et des types de pneumatiques vendus l'année précédente, la collecte et l'élimination des pneus par les fabricants et les importateurs, les possibilités de valorisation des pneus par le biais du réemploi, du rechapage et de l'utilisation pour les travaux publics ou les travaux de remblaiement. *Renouveler* traduit la volonté de substituer des matériaux bio-sourcés ou des biomatériaux aux matières premières. Des matières telles que les écorces d'orange et de citron, l'huile de tournesol ou l'huile de résine pin sont ainsi incorporées au pneumatique pour atteindre les objectifs de 2050.

Figure 4 : L'économie circulaire chez Michelin des 4R



Source : Michelin (2019)

Si nous adaptions les sept piliers à l'industrie du pneumatique et plus précisément à la société Michelin, alors la symbiose ferait de la proximité (relocalisation), l'un des principaux piliers de l'économie circulaire.

Figure 5 : Les 7 Piliers de l'économie circulaire



Debladis, Diakhate, Goineau, Taillandier, Diemer (2019)

La chaleur des fours de Michelin pourrait servir à sécher les productions céréalières des agriculteurs de Limagrain. Les textiles collectés par Emmaüs - notamment ceux contenant du PET - et par Valtom (syndicat pour la valorisation et le traitement des déchets ménagers et assimilés) pourraient également finir dans les processus de production de Michelin pour confectionner les pneumatiques de demain (projet White Cycle). Les programmes structurés et planifiés de symbiose industrielle pourraient ainsi amener les entreprises à collaborer de façon innovante, en recherchant ensemble de nouvelles formes d'utilisation des ressources afin de réduire les déchets (et leurs coûts associés) et accroître leurs revenus. L'ère de la sous-traitance et du donneur d'ordre ferait ainsi place à celle de la collaboration et de la mise en commun de moyens (Sonel, Gür & Eren, 2021).

Les symbioses industrielles, les prémisses d'une industrie 6.0 ?

En insistant sur le fait que les symbioses industrielles sont un levier essentiel (seconde étape après l'écoconception) de la transition vers une économie circulaire (Alvarez, Ruiz-Puente, 2017) ou de la transition énergétique (Fraccascia & al., 2021), il n'y a qu'un pas à faire pour imaginer leur impact sur l'industrie du futur (livre blanc, 2016). Les symbioses industrielles s'inscrivent dans un processus historique de trajectoire industrielle, qui a débuté au 19^{ème} siècle avec le concept d'industrie 1.0 (mécanisation et standardisation du travail) et s'est prolongé au 20^e siècle avec le concept industrie 4.0, échanges de données via l'intelligence artificielle (Scafa & al., 2020 ; Tseng & al., 2018).

Tableau 1 : Les étapes de la transition industrielle

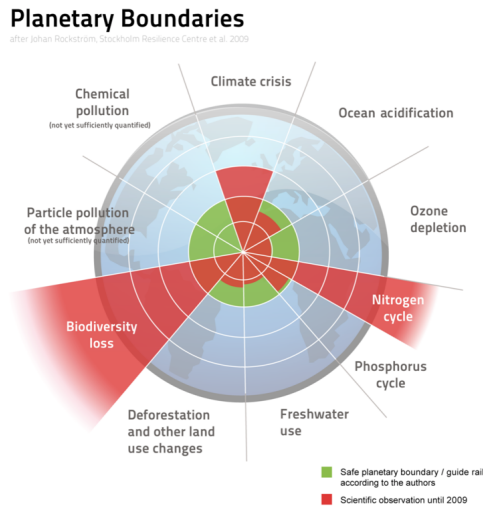
Industrie 1.0	Industrie 2.0	Industrie 3.0	Industrie 4.0	Industrie 5.0	Industrie 6.0
<p>Mécanisation et standardisation du travail. Accent mis sur la productivité humaine.</p> <p>Introduction de la vapeur dans la mécanisation du travail</p>	<p>Introduction de l'électricité dans les différents processus de production.</p> <p>Utilisation de chaînes de montage.</p> <p>Aucune discontinuité dans la production</p>	<p>Introduction de l'informatique et de l'automatisation pour contrôler le processus industriel.</p> <p>Utilisation de robots dans la production (programmation linéaire gérée par l'homme)</p>	<p>C'est l'ère des systèmes cyber-physiques (CPS) qui comprennent des machines intelligentes, des systèmes de stockage et des installations de production capables d'échanger des informations (toile numérique industrielle) de manière autonome, de déclencher des actions et de se contrôler indépendamment</p>	<p>Volonté de réinjecter l'humain dans la production industrielle.</p> <p>C'est la tendance mondiale actuelle, avec la création d'usines intelligentes, le développement de l'IoT (« Internet of Things ») et des industries collaboratives.</p>	<p>Engagement des industriels à respecter les limites planétaires et un plancher social</p> <p>L'économie circulaire s'engage à ouvrir les boucles de différents sous-systèmes de manière à les mettre en interaction.</p> <p>L'usage du Big Data, du Data Management et de l'intelligence artificielle est mis au service des parties prenantes</p> <p>Conventions citoyennes pour définir les priorités en matière de circularité</p>

Source : Diemer, Dierickx (2020)

L'industrie 5.0 et 6.0 seraient les prochaines étapes d'un long processus, le défi sociétal consiste à la fois à réinjecter de l'humain dans la production industrielle (Xu & al., 2021 ; Longo & al., 2020) et à conduire les industries vers une stratégie de durabilité forte (Diemer, Dierickx, 2020 ; Cecchin & al., 2020).

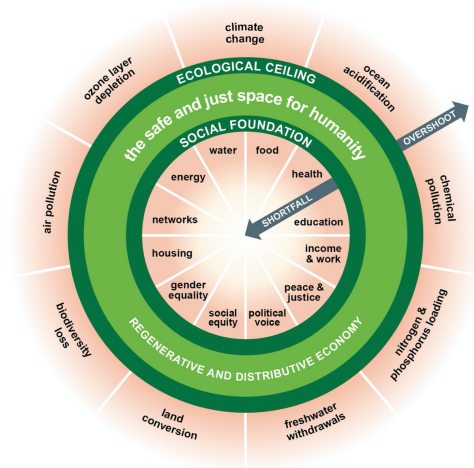
L'industrie 6.0 conduirait à intégrer les symbioses dans un cadre d'économie circulaire respectant des critères importants en matière de durabilité. Les symbioses seraient ainsi des formes d'innovation sociale, s'inscrivant dans les *Planet Boundaries* (Rockstrom & al., 2009) et l'économie du Doughnut (Raworth, 2017).

Figure 6 : Planet's Boundaries



Source : Rockstrom (2009)

Figure 7 : Doughnut Economics



Source : Raworth (2017)

On pourrait alors leur assigner les huit défis suivants : (1) positionner l'industrie au cœur de la durabilité ; (2) définir l'écosystème industriel à l'échelle locale ; (3) réintroduire l'industrie dans l'écosystème urbain; (4) introduire l'agriculture et les activités agricoles dans les symbioses; (5) développer des projets de bioéconomie en liant matière, énergie et information; (6) transformer le CO₂ en produits; (7) définir un cadre de référence pour les symbioses industrielles susceptibles d'identifier des îlots de durabilité et; (8) repenser les dynamiques sociales accompagnant les différentes phases de la transition industrielle. L'importance de l'échelle locale peut s'observer dans les parcs éco-industriels ou les corridors industriels qui sont inscrits dans l'écosystème urbain qui ne cherche plus à rejeter l'industrie et à la faire disparaître des limites d'une ville, mais qui se fonde sur la recherche de synergies potentielles au sein de la ville durable. L'agriculture prend aussi une place importante en particulier dans les symbioses urbaines (l'agriculture urbaine) et dans des projets bioéconomiques basées sur la biotechnologie, thermodynamique (entropie) et les sciences de l'information.

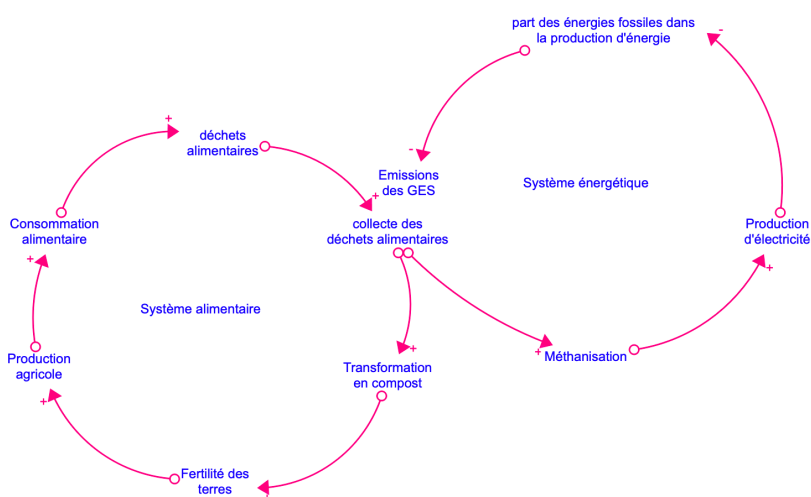
Cette transformation de l'industrie (plus particulièrement des industries européennes) devrait pouvoir être capable d'intégrer de nombreux domaines, de mieux gérer la complexité et d'intégrer les défis sociétaux dans la chaîne d'approvisionnement et mieux appréhender les impacts socio-environnementaux des innovations industrielles. Entre les échelles et domaines qui cherchent à être abordées de façon interdisciplinaire on trouve le paradigme locaux/globaux de la symbiose industrielle – stratégies ascendantes/descendantes ; les échelles croisées pour les symbioses urbaines et

industrielles ; les aspects sociaux/environnementaux/économiques/culturels de la dynamique de la symbiose industrielle ; les industries et les secteurs économiques défiant la transition vers les énergies renouvelables ; les émissions de gaz à effet de serre ; les déchets électroniques ; les métaux rares entre autres.

Dès lors, l'économie circulaire se définirait comme une sorte de cartographie des flux et des stocks biophysiques et économiques d'un territoire. Ces flux et ces stocks auraient la particularité de générer des boucles de rétroaction, amplifiant la dynamique du système (boucle notée R +) ou la régulant (boucle B -). *Les Causal Loops Diagrams* (CLD) et les *Stocks and Flows Diagrams* (SFD) sont les principaux outils de la dynamique des systèmes. Dans le cas présent, les symbioses industrielles comme l'économie circulaire relèveraient d'un champ que l'on appelle « Industrial Dynamics » (Forrester, 1961). Industrial Dynamics consiste à étudier « *the behavior of industrial systems to show how policies, decisions, structure, and delays are interrelated to influence growth and Stability* » (Forrester, 1961, p. vii).

Le passage à l'industrie 6.0 traduit ainsi l'idée que l'économie circulaire – via les symbioses industrielles – doit jouer sur le couple bouclage/ouverture des boucles (closing/opening the loops) en cherchant à saisir toutes les opportunités que leur offrent les nombreuses interactions des systèmes complexes. Nous retrouvons ici une caractéristique des diagrammes de boucles causales, l'apparition d'une variable médiation qui crée le lien entre deux sous-systèmes. La figure 8 donne une illustration d'interconnexion entre le système alimentaire et le système énergétique via la collecte des déchets alimentaires.

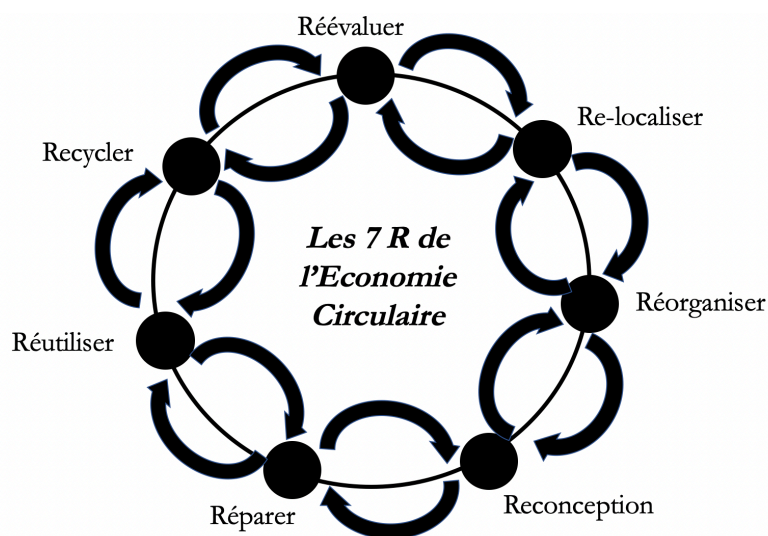
Figure 8 : Ouvrir une boucle causale



Mais ce n'est pas tout, pour s'inscrire dans une approche de durabilité forte, l'industrie 6.0 préconise de redéfinir les ordres de priorité en matière de production et de consommation durables. Ainsi, la représentation des 7R se trouve modifiée de la manière suivante (Diemer, 2012).

Le premier pilier doit amener les acteurs à réévaluer collectivement les besoins (vitaux) ainsi que les valeurs d'usage des biens qu'il convient de produire et de consommer. Cette réévaluation renvoie directement à l'économie de la fonctionnalité, bornée par les limites planétaires et un plancher social. Ce n'est qu'une fois que cette réévaluation aura été faite qu'il sera possible de relocaliser les chaînes de valeur et les outils de production. Cette relocalisation définit les prémisses d'une symbiose (à savoir les relations de proximité). C'est à partir de là, qu'une symbiose va pouvoir émerger (la relocalisation impose de rechercher des partenaires locaux), en créant des synergies entre les différentes valeurs existantes (élimination ou valorisation d'un déchet) et en multipliant les contacts entre diverses parties prenantes. Cette démarche collaborative implique une forme de réorganisation sectorielle ou de filière (importance de la logistique, de la communication). Les symbioses deviennent des formes organisationnelles susceptibles de dégager des bénéfices économiques et environnementaux. Ces innovations sociales sont amenées à reconceptualiser bon nombre de produits et de chaînes de valeurs. L'éco-conception, la prise en compte du cycle de vie, la lutte contre l'obsolescence programmée vont permettre d'orienter les produits vers les trois derniers piliers de l'économie circulaire, générant ainsi plusieurs effets cascades – il s'agit de la réparation, de la réutilisation et du recyclage.

Figure 5 : Economie circulaire, symbioses et durabilité forte



Source : Diemer (2012)

Les 7 R de l'économie circulaire sont une expression de l'industrie 6.0, et de son ancrage dans une durabilité forte. Il sera ici nécessaire de collecter et de regrouper les données à l'échelle locale (logique de data-management) et de promouvoir l'intelligence artificielle pour optimiser la chaîne de valeur et améliorer la circularité (on pense notamment au taux de matières durables dans le processus de production). Bien entendu, les parties prenantes seront associées au processus de modélisation de l'économie circulaire et pourront définir ensemble les indicateurs ainsi que les cibles de durabilité forte (% de déchets, émissions de GES, consommation d'eau...).

Les symbioses industrielles comme point d'orgue de la stratégie industrielle et climatique européenne

Fort de leur succès et de leur ancrage dans l'économie circulaire et le développement durable, les symbioses industrielles ont attiré l'attention de la Commission européenne, qui voit à travers ces modèles d'organisations de proximité, un puissant catalyseur de la transition énergétique et de l'adaptation au changement climatique (Diemer & al., 2020). Depuis 2018, les symbioses industrielles sont même entrées dans les programmes Horizon 2020 et Horizon 2021-2027 via le domaine Industrial Sustainability. Il s'agit notamment d'une réflexion en matière d'industrie de transformation qui englobe le ciment, la céramique, le génie chimique, les minéraux et les minerais, les métaux non ferreux, l'acier et l'eau (EC, 2019). Ensemble, ces secteurs constituent le socle de la base manufacturière européenne, représentant plus de 20% de l'industrie européenne en termes d'emplois et de chiffre d'affaires. Ces secteurs se caractérisent par une forte dépendance vis-à-vis des matières premières et de l'énergie dans leurs technologies de production et de transformation. Celles-ci devenant de plus en plus rares, l'éco-efficacité des ressources est désormais un facteur clé de la compétitivité et de la transition vers une industrie 5.0 européenne. En conséquence, l'industrie 5.0 doit être comprise comme une phase d'approfondissement de l'industrie 4.0, car elle concentre la recherche sur les principaux moteurs de la transition vers une industrie européenne centrée sur l'humain, le durable sur le plan environnemental et la résilience, ce qu'apportent des contributions significatives à l'économie circulaire et au changement climatique, optimisant ainsi le traitement industriel, réduisant la consommation d'énergie et de ressources et minimisant les déchets.

Les symbioses industrielles s'inscrivent dans des logiques intersectorielles interconnectées pour une durabilité industrielle améliorée. Ces améliorations sont centrées principalement sur l'efficacité des ressources et de l'énergie dans l'industrie de transformation et elles peuvent être accomplies par une meilleure intégration des opérations industrielles pour éviter les rendements environnementaux décroissants. On peut trouver des cas de succès centrés sur l'efficacité de ressources dans la valorisation des flux d'énergie, d'eau et de matériaux.

Ce passage aux symbioses industrielles dans la stratégie de développement durable de la Commission Européenne doit être accompagné d'études d'impacts socio-économiques et environnementales quantifiables et significatives. Cette requête renvoie aux difficultés rencontrées par de nombreuses études à l'échelle nationale (Angleterre, Chine, Finlande, France, Australie, etc.) lorsqu'il s'agit de chiffrer les gains économiques et environnementaux réels des symbioses. Plusieurs impacts peuvent ainsi être identifiés si on fait une évaluation systémique capable d'intégrer la performance individuelle des entreprises au gain collectif de la fermeture et de l'intensification des boucles causales. Il s'agit d'améliorer l'efficacité énergétique des

procédés industriels visés, de réduire l'intensité énergétique totale ainsi que l'intensité de consommation des matières premières. Des exemples ponctuels de cette dynamique des systèmes peuvent être identifiés dans la réduction des gaz à effet de serre, dans l'analyse du cycle de vie complet et dans les efforts de réduction de déchets. Au-delà des chiffres, il s'agit surtout de mieux comprendre les obstacles qui se dressent devant les symbioses industrielles (technologiques, socioéconomiques et environnementales) et le potentiel de réplication de ces innovations sociales et organisationnelles à l'échelle des différents territoires (Morales, Diemer, 2019).

Conclusion

En quelques années, les symbioses industrielles sont devenues les ambassadrices d'une révolution managériale (importance de la confiance mutuelle et de la communication externe) et industrielle (collaboration, création d'une valeur commune, résistance collective aux chocs exogènes). Au-delà des flux d'énergies, de matières ou de déchets comptabilisés dans les études du métabolisme industriel, les symbioses se présentent comme de véritables innovations sociales (Spekkink, 2016), permettant de comprendre toute la complexité des chaînes d'approvisionnement et de valeurs (importance des coproduits). La success story de la symbiose industrielle de Kalundborg au Danemark a fait l'objet d'une littérature abondante (notamment via l'évaluation des bénéfices économiques et environnementaux) et essaimé de nombreuses initiatives de par le monde (exemple de la bioraffinerie de Pomacle-Bazancourt en France). Les symbioses permettent à la fois d'engager les industriels dans une stratégie de durabilité forte (notamment via les 4 piliers : éco-efficacité, collaboration, proximité et résilience) et de promouvoir un outil organisationnel de l'économie circulaire. L'industrie 6.0 ressemble plus à un scénario de science-fiction qu'à une nouvelle étape de la transition industrielle, cependant les défis environnementaux et climatiques passent par des stratégies collaboratives dans lesquelles les solutions symbiotiques du type win-win s'imposeront de plus en plus. L'Europe l'a bien compris, si les symbioses ont longtemps été rattachées aux programmes de l'industrie du futur, elles font une entrée fracassante dans des domaines tels que les énergies renouvelables, les systèmes alimentaires et agroalimentaires ou encore les villes durables.

Références bibliographiques

- AIMON D., PANIER E. (2014), La mise en pratique de l'économie circulaire chez Michelin, *Annales des Mines – Responsabilité et Environnement*, n°76, p. 38 – 44.
- ALVAREZ R., RUIZ-PUENTE C. (2017). Development of the Tool Symbiosis to Support the Transition Towards A Circular Economy Based on Industrial Symbiosis Strategies. *Waste Biomass Valor*, vol 8, 1521 – 1530.
- BAAS L. W., BOONS, F. A. (2004). An industrial ecology project in practice: Exploring the boundaries of decision-making levels in regional industrial systems. *Journal of*

Cleaner Production. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.005>

BALDASSARE B., SCHEPERS M., BOCKEN N., CUPPEN E., KOREVAAR G., CALABRETTA G. (2019), Industrial Symbiosis : towards a design process for eco-industrial clusters by integrating circular economy and industrial ecology perspectives. *Journal of Cleaner Production*, vol 216, p. 446 – 460.

BEAURAIN C., BRULLOT S. (2011). L'écologie industrielle comme processus de développement territorial: une lecture par proximité. *Revue d'Economie Régionale & Urbaine*, 2, p. 313–340.

BENNICH T., BELYAZID S., STJERNQUIST I., DIEMER A., KALANTARI Z. (2021). The Bio-based Economy, 2030 Agenda and Strong Agenda – A Regional Scale Assessment of Sustainability Goal Interactions. *Journal of Cleaner Production*. Vol 280, January, 124451. p. 1 – 50.

BLOMSMA F., BRENNAN G. (2017). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, vol 21, n°3, p. 603 – 614.

BOUTILLIER C., THENOT M., LESCIEUX-KATIR H. (2018). Capitalisme patient et symbiose industrielle :le cas d'une bioraffinerie territorialisée. *Économie Rurale*. <https://doi.org/10.4000/economierurale.5436>

BUCLET N. (2011). Ecologie industrielle et Territoriale. Septentrion.

CECCHIN A., SALOMONE R., DEUTZ P., RAGGI A., CUTAIA L. (2020). *Relating Industrial Symbiosis and Circular Economy to the Sustainable Development debate in* Salomone R. and al. (eds). *Industrial Symbiosis for the Circular Economy. Strategies for Sustainability*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36660-5_1

CETTEI (2013). *Création d'une symbiose industrielle*. Centre de Transfert Technologique en Ecologie Industrielle. Quebec. Canada.

CHERTOW M.R, EHRENFELD J. (2012). Organizing Self-Organizing Systems. Toward a Theory of Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, vol 16, p. 13 – 27.

CHERTOW M. R. (2007). "Uncovering " Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 11–30. Retrieved from www.mitpressjournals.org/jie

CHERTOW M.R (2004). *Industrial Symbiosis in Encyclopedia of Energy*, Cleveland C.J (ed), Oxford.

CRISTAL UNION (2018). *Rapport d'activites 2017/2018* Cristal Union.

D'AMATO D., DROSTE N., KETTUNEN M., LÄHTINEN K., KORHONEN J., LESKINEN P., MATTHIES B.D, TOPPINEN A. (2017). Green, Circular, Bio economy : A comparative analysis of Sustainability Avenues. *Journal of Cleaner Production*, vol 168, p. 716 – 734.

DEBLADIS L., DIAKATE F., GOINEAU M., TAILLANDIER M., DIEMER A. (2019). Michelin, entre diagnostic global et prospective économique. *Revue Francophone du Développement Durable*, n°14, octobre, p. 22 – 67.

DIEMER A., MORALES M. (2022). Les symbioses industrielles ouvrent une nouvelle ère économique. *La Recherche*, n° 569, mars, p. 56 – 59.

DIEMER A., DIERICKX F. (2020). *Circular Economy, A New Paradigm*. In Diemer A., Nedelciu E., Schellens M., Morales M., Oostdijk M. (eds), *Paradigms, Models, Scenarios and Practices for Strong Sustainability*, Editions Oeconomia.

DIEMER A., NEDELCIU E., SCHELLENS M., MORALES M., OOSTDIJK M. (2020). *Paradigms, Models, Scenarios and Practices for Strong Sustainability*, Editions Oeconomia.

DIEMER A., TORRES J. (2020). *Economie circulaire et symbioses industrielles*, présentation à Michelin, Site de Ladoux, 13 janvier, 13 p.

DIEMER A., MORALES M. (2016). L'écologie industrielle et territoriale peut-elle s'affirmer comme un véritable modèle de développement durable pour les pays du Sud ? Illustration par le cas de la symbiose industrielle de TAMPICO au Mexique. *Revue Francophone du Développement Durable*, hors-série n° 4, Décembre, p. 52 - 71.

DIEMER A. (2016). Les Symbioses industrielles, un nouveau champ d'analyse pour l'économie industrielle, *Innovations*, n°50, p. 65 - 94.

DIEMER A. (2015), « Qu'avons-nous appris des symbioses industrielles ? » in Juncqua G., Brullot S. (dir), *Ecologie industrielle et territoriale*, Presses des Mines d'Alès, p. 173 - 187.

DIEMER A. (2013), « L'écologie industrielle, 40 années d'expériences, les leçons d'un succès », in Diemer A., Figuière C., Pradel M. (dir), *Ecologie politique vs écologie industrielle, quelles stratégies pour le développement durable ?* Editions Oeconomia, p. 133 - 161.

DIEMER A. (2012), « Technology and Sustainable Development » in Laperche B., Uzinidis D. (eds), *Crisis, innovation and Sustainable Development*, Edward Elgar Publisher.

DIEMER A. (2012). Aller au-delà du développement durable et se forger de nouveaux paradigms, que nous disent la post croissance et de la décroissance ? In Diemer A. (eds). *Le développement durable et les économistes*. Oeconomia.

DIEMER A., DANNEQUIN F. (2009), « Le capitalisme dématérialisé comme développement durable » in Laperche B., Crétieneau A, Uzinidis D. (dir.), *Le Développement Durable, pour une Nouvelle Economie*, Peter Lang.

DOMENECH, T., BLEISCHWITZ R., DORANOVA A., PANAYOTOPOULOS D., ROMAN L. (2019). Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy. *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.016>

DOMENECH T., DAVIES M. (2011). Structure and Morphology of Industrial Symbiosis Networks : the case of Kalundborg. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, vol 10, p. 79 - 89.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION (2015). *Circularity Indicators : An Approach to Measuring Circularity*.

EHRENFELD J.R, CHERTOW M.R (2002). *Industrial Symbiosis : the legacy of Kalundborg*. Handbook of Industrial Ecology. p. 334 - 348.

EUROPEAN COMMISSION (2019). *The European Green Deal*. Brussels, 11/12/2019, COM (2019) 640 final.

- FORRESTER J.J (1961). *Industrial Dynamics*. MIT. Library of Congress. USA.
- FRACCASCIA L., YAZDANPANAH V., VAN CAPELLEVEEN G. (2021). Energy-based industrial symbiosis: a literature review for circular energy transition. *Environ Dev Sustain* 23, 4791–4825 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00840-9>
- FROSCH R.A, GALLOPOULOS N.E. (1989), “Strategies for Manufacturing”, *Scientific American*, vol 261, Special Issue Managing Planet Earth, September, pp. 144 - 152. Traduction française, “Des stratégies industrielles viables”, *Pour la Science*, vol 145, novembre, p. 106 -115.
- LI J., GAO, Y. (2013). Research on Eco-Industry Symbiosis System Based on Complex Network. In: Dou, R. (eds) Proceedings of 2012 3rd International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2012). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33012-4_76
- GOLEV A., CORDE G.D, GIURCO D.P (2014). Barriers to Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, vol 19, n°1, p. 141 - 153.
- HERCZEG G., AKKERMAN R., HAUSCHILD M.Z (2018). Supply Chain Collaboration in Industrial Symbiosis Networks. *Journal of Cleaner Production*, vol 171, p. 1058 - 1067.
- HOLLING C.S (1973). Resilience and Stability of Ecology and Systematics. *Annual Reviews*, vol 4, p. 1 - 23.
- IACONDINI A., MENCHERINI U., MORSELLI L., PASSARINI F., VASSURA I. (2014). Industrial Symbiosis in Italy as a Tool for Sustainability : Case Study Analysis and Replicability. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, vol 1, p. 19 -24.
- JUNQUA G., BRULLOT S. (2015). *Ecologie industrielle et territoriale*. Presses des Mines d’Alès.
- WOLF A., KARLSSON M., (2008). Evaluating the environmental benefits of industrial symbiosis: discussion and demonstration of a new approach, *Progress in Industrial Ecology, An International Journal*, 5(5-6), p. 502-517.
- LABRUNE S., DIEMER A. (2007), « L’écologie industrielle : quand l’écosystème industriel devient un vecteur du développement durable », *Revue Développement Durable et Territoires Fragiles*, octobre, p. 1-20.
- LAWAL M., WAN ALWIS.R, MANAN Z.A, SHIN HO W. (2021). Industrial Symbiosis Tools – A Review. *Journal of Cleaner Production*, vol 280, p. 1 - 20.
- LIVRE BLANC (2016). Transformer l’industrie par le numérique. Livre Blanc Industrie du futur. *Syntec Numérique*. Avril, 36 p.
- LONGO F., PADOVANO A., UMBRELLO S. (2020). Value-Oriented and Ethical Technology Engineering in Industry 5.0 : A human- Centric Perspective for the Design of the Factory of the Future. *Applied Science*, vol 10, p. 1 - 25.
- MENEGHETTI A., NARDIN G. (2012). Enabling Industrial Symbiosis by a Facilities Management Optimization Approach. *Journal of Cleaner Production*, vol 35, novembre, p. 263 - 273.

- MEEM (2016). Economie Circulaire, les avancées de la loi de transition énergétique pour la croissance verte. *Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer*. Décembre.
- MORALES M., DIEMER A. (2019), « Industrial Symbiosis Dynamics, a Strategy to Accomplish Complex Analysis, the Dunkirk Case Study », *Sustainability*, vol 11, p. 1 – 18.
- MORALES M., BEFORT N., DIEMER A. (2019). Symbiose industrielle, une stratégie de bioéconomie circulaire. L'analyse de la betterave sucrière dans la plateforme de Bazancourt-Pomacle. *Revue Francophone du Développement Durable*, n° 14, octobre, p. 1 – 21.
- MORALES E. M., DIEMER A., CERVANTES G., CARILLO-GONZALES G. (2019). "By-product synergy" changes in the industrial symbiosis dynamics at the Altamira-Tampico industrial corridor: 20 Years of industrial ecology in Mexico. *Resources, Conservation and Recycling*, vol 140, p. 235 – 245.
- NOTARNICOLA B., TASSIELLI G., RENZULLI P.A (2016). Industrial Symbiosis in the Taranto Industrial District : Current Level , Constraints and Potential New Synergies. *Journal of Cleaner Production*, vol 122, p. 133 – 143.
- NEVES A., GODINA R., AZVEDOS S., MATIAS J.C.O (2020). A Comprehensive Review of Industrial Symbiosis. *Journal of Cleaner Production*, vol 247, p. 1 – 39.
- NIELSEN S. N. (2007). What has modern ecosystem theory to offer to cleaner production, industrial ecology and society? The views of an ecologist. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.008>
- ONITA J. A., AUTHOR F., AHOADA J., SAMMANFATTNING O. (2006). *How does industrial symbiosis influence environmental performance?* Linkopings Universitet.
- PAQUIN R.L, BUSCH T., TILLEMANN S. (2013). Creating Economic and Environmental Value through Industrial Symbiosis. *Longe range Planning*, p. 1 – 13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lrp.2013.11.002>
- RAWORTH K. (2017). *Doughnut Economics*. Chelsea Green Publishing.
- ROCKSTRÖM J. & Al. (2009). 2009. Planetary boundaries:exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society* **14**(2): 32. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol14/iss2/art32/>
- SAAVEDRA Y. M. B., IRITANI D. R., PAVAN A. L. R., OMETTO A. R. (2018). Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 170, 1514–1522. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.260>
- SANTOS V. E. N., MAGRINI A. (2018). Biorefining and industrial symbiosis: A proposal for regional development in Brazil. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.107>
- SCAFA M., MARCONI M., GERMANI M. (2020). A Critical Review of Symbiosis Approaches in the context of Industry 4.0. *Journal of Computational Design and Engineering*, vol 7, n°3; p. 269 – 278.
- SODERGREN K., PALM J. (2021). The Role of Local Governments in Overcoming Barriers to Industrial Symbiosis. *Cleaner Environmental Systems*, vol 2, june, p. 1 – 8.

- SONEL E., GUR S., EREN T. (2021). Analysis of Factors Affecting Industrial Symbiosis Collaboration. *Environmental Science and Pollution Research*, vol 29, p. 8479 – 8486.
- SPEKKINK W. (2016). *Industrial Symbiosis as a Social Process*. Erasmus University Rotterdam.
- TADDEO R., SIMBOLI A., MORGANTE A., ERKMAN S. (2017). The Development of Industrial Symbiosis in Existing Contexts. *Experiences From Three Italian Clusters*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.04.006>
- TADDEO R., SIMBOLI A., IOPPOLO G., MORGANTE A. (2017). Industrial Symbiosis, Networking and Innovation : The Potential Role of Innovation Poles. *Sustainability*, vol 9, p. 1 – 17. doi:10.3390/su9020169
- THENOT M., HONORINE FFE, K. (2017). La bioéconomie industrielle à l'échelle d'une région : la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle, tremplin d'une stratégie territoriale. Retrieved from <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles-2017-1-page-66.htm>
- TSENG M.L, TAN R.R, CHIU A.S.F, CHIEN C.F, KUO T.C (2018). Circular Economy Meets Industry 4.0 : Can Big Data Drive Industrial Symbiosis. *Resources, Conservation and Recycling*, vol 131, p. 146 – 147.
- TURKEN N., GEDA A. (2020). Supply Chain Implications of Industrial Symbiosis : A Review and Avenues for Futur Research. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol 161, p. 1 – 21.
- VAN CAPELLEVEEN G., AMRIT C., YAZAN D.M (2018). A Literature Survey of Information Systems Facilitating the Identification of Industrial Symbiosis. In: Otjacques, B., Hitzelberger, P., Naumann, S., Wohlgemuth, V. (eds) *From Science to Society*. Progress in IS. Springer, Cham.
- WOJTKOWSKI V. (2019), *De la toile industrielle au Toile Maker, les opportunités de la symbiose industrielle territoriale*, AGUR & POSSIBILIZZEURS.
- XU X., LU Y., VOGEL-HEUSER, WANG L. (2021). Industry 4.0 and industry 5.0 – Inception, conception and perception. *Journal of Manufacturing Systems*, vol 61, p. 530 – 535.
- YU Y., YAZAN D.M, BHOCHHIBHOYA, VOLKER L. (2021). Towards Circular Economy Through Industrial Symbiosis in the Dutch Construction Industry : A case Recycled Concrete Aggregates. *Journal of Cleaner Production*, vol 293, p. 1 – 15.