

# La symbiose industrielle et urbaine, une stratégie innovante pour la bioéconomie : le cas de la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle

**MANUEL E. MORALES** » Chercheur postdoctorant

NEOMA Business School, chaire de bioéconomie industrielle

## RÉSUMÉ

La symbiose industrielle et urbaine (SIU) se présente comme une stratégie interentreprise s'inscrivant dans une logique d'allocation efficiente et résiliente de ressources du système d'approvisionnement. Dans cet article, la théorie de la proximité et la méthodologie de la dynamique des systèmes territoriaux constituent le socle théorique d'analyse de la bioraffinerie. À travers cette méthodologie, en utilisant des boucles de rétroaction causale du process d'innovation de la betterave sucrière, sont identifiés les leviers et les obstacles institutionnels, les acteurs et l'évolution de leurs interactions dans un écosystème agro-industriel complexe. Ainsi, l'article présente trois scénarios (référence, évolution du portefeuille de valorisation de la betterave sucrière et diminution de la production de betterave sucrière) afin de mieux comprendre la valorisation betteravière (jus vert, sirop de basse pureté, CO<sub>2</sub> et vinasse). Cette dernière englobe les stratégies du développement durable en vue d'une amélioration de la performance de l'écosystème agro-industriel de la plateforme de Bazancourt-Pomacle (PBP). Cela confère un avantage comparatif à une échelle d'analyse micro par rapport à la prévision statistique descriptive, dû à l'intégration de la structure institutionnelle pour opérationnaliser la fonctionnalité et la rationalité causale et ainsi répondre aux enjeux de l'action collective. Nous partons du postulat selon lequel la PBP remplit toutes les conditions d'une SIU, ce qui permet d'expliquer le rôle de l'analyse géographique, en identifiant les boucles qui renforcent ou régulent la durabilité sous-jacente d'une région dotée d'une forte tradition agricole et agro-industrielle. Cette étude vise à inciter les décideurs à arbitrer, en matière de valorisation de la biomasse, avec une rationalité systémique afin de mettre en place des dispositifs multisectoriels.

## MOTS-CLÉS

bioraffinerie ; dynamique des systèmes ; proximité ; économie circulaire

## PLAN DE L'ARTICLE

### INTRODUCTION

#### CADRE THÉORIQUE DE LA SYMBIOSE DANS LA BIORAFFINERIE

**Du déchet au coproduit, une analyse institutionnelle de cette transition**

**La bioraffinerie : une institution de coordination**

**Les effets rebond, une analyse systémique causale**

### MÉTHODOLOGIE

### DISCUSSION

**Politique européenne et arbitrage en quête d'une économie circulaire**

**Leviers de la valorisation de coproduits issus de la betterave sucrière**

### RÉSULTATS

### CONCLUSION

### RÉFÉRENCES

## INTRODUCTION

Le concept de ville durable a été introduit par Urban Ecology, une organisation à but non lucratif fondée en 1975 par Richard Register (Roseland, 1997). Il s'inscrit dans une quête de bien-être des citoyens à travers une approche globale de la planification et de la gestion urbaines visant à réduire ou à valoriser les déchets et les émissions. D'un point de vue systémique, une ville durable peut être décrite comme l'ensemble des sous-systèmes complexes qui doivent être associés ou connectés afin d'entreprendre une transition durable (Diemer & Morales, 2016). L'industrie se présente comme un des sous-systèmes de la ville durable, et son importance n'est pas négligeable car elle participe à la production des déchets plus vite que n'importe quel polluant environnemental, gaz à effet de serre inclus.

En moins de 10 ans, de 2003 à 2012, la production mondiale de déchets par habitant a augmenté de plus de 87 %. Les centres urbains sont les principaux producteurs mondiaux de déchets solides (Hoorweg, Bhada-Tata & Kennedy, 2015) ; en conséquence, nous pouvons supposer que les villes sont les institutions les mieux placées pour lutter contre les problèmes globaux comme l'épuisement des matières premières et la surproduction systémique de déchets. Plusieurs stratégies peuvent être envisagées par les villes afin d'enrayer le pic de production de déchets et d'extraction des ressources issues de différents gisements : l'atténuation – voir notamment les travaux sur la réduction de la courbe de croissance – ou encore l'adaptation, mise en lumière par les études de Hertwich (2005), Kasmir (2018) et Kennedy, Baker, Dhakal & Ramaswami (2012), entre autres, qui vise à mieux maîtriser les effets grâce à une approche systémique de la recherche d'une durabilité forte<sup>1</sup>. ►

<sup>1</sup>La durabilité forte s'entend en opposition avec l'économie néoclassique du bien-être (Daly, 1991), où la principale préoccupation des générations futures est uniquement le stock global de capital « humain » et « naturel ». Une durabilité forte refuse le fait que le capital naturel puisse être considéré comme substituable dans la production de biens de consommation et comme fournisseur direct de services publics.

Nous vivons une période préoccupante ; la quantité de déchets ne baisse pas, tandis que la filière recyclage n'est pas à la hauteur des enjeux actuels. Une solution est de penser les déchets non plus comme les résidus indésirables des processus de production, mais comme des coproduits qui sont réintégrés comme ressources dans ces processus. La réutilisation systématique des coproduits définit l'économie circulaire qui peut s'appliquer, à terme, à toutes les productions, y compris les plus polluantes. Elle est en même temps le fondement de l'écologie industrielle (Baas & Boons, 2004 ; Chertow, 2007 ; Taddeo, Simboli, Morgante & Erkman, 2017) et des institutions (Roggero, Bisaro & Villamayor-Tomas, 2018). La notion de parties prenantes est ainsi devenue essentielle à la compréhension de cette relation car, en façonnant le comportement individuel dans un contexte social, les institutions créent un haut degré d'articulation et de coopération nécessaire pour surmonter les dilemmes sociaux auxquels les individus ne sont pas en mesure de répondre individuellement.

L'analyse de la littérature concernant la théorie institutionnelle et la théorie des systèmes complexes nous amène à formuler l'hypothèse selon laquelle les trajectoires (*path dependencies*), intégrées dans un cadre institutionnel et soumises au processus du changement adaptatif institutionnel, sont déterminées par les modèles comportementaux (*behavioral patterns*) actuels. Ce postulat, qui semble d'une logique causale et temporelle évidente, revêt une importance majeure car il s'installe comme une passerelle entre deux concepts issus de théories qui communiquent rarement, en attendant d'orienter dans cette direction des recherches futures : l'économie géographique et la dynamique des systèmes pour identifier des trajectoires en fonction des comportements présents des acteurs, intégrés dans le cadre institutionnel de l'activité agro-industrielle.

Avant de développer cette hypothèse, il convient de revenir sur la notion de bioéconomie. Dans cette étude, elle est vue comme une mutation de paradigme, une transformation de l'amont à l'aval de matières premières renouvelables en produits pour l'alimentation humaine et animale, en molécules d'intérêt, en énergie, en biomatériaux et en autres produits biosourcés (Fuentes-Saguar, Mainar-Causapé & Ferrari, 2017 ; Germont, 2019). La bioéconomie est porteuse d'un objectif systémique qui dépasse la logique de filière. Circulaire par nature, elle suppose une transformation des modes de production et de consommation dans les domaines de l'alimentation, de l'énergie et des matériaux, ainsi que des circuits économiques. Cela rejoint la logique de gestion durable (eau, air, sols, biodiversité) et de circularité (Germont, 2019).

Quant à la symbiose industrielle et urbaine (SIU), elle est définie ici comme le processus de coopération entre plusieurs parties prenantes qui cherchent à renforcer la circularité sur un territoire, selon les principes de l'efficacité et de la résilience (Diemer & Morales, 2016). Afin de mettre en évidence les modes de fonctionnement de la bioéconomie circulaire dans une SIU, nous proposons le modèle de simulation de la betterave sucrière sur la plateforme de Bazancourt-Pomacle (PBP). Le modèle du système betteravier remplit les trois conditions pour être considéré comme une SIU : 1. Les déchets d'une structure deviennent la matière première d'une autre ; 2. Les profits économiques et/ou environnementaux résultent de cette démarche ; 3. L'existence d'une interdépendance entre les parties prenantes qui composent l'écosystème industriel (Diemer, 2016). ►

Cet article a pour objectif de fournir des éléments de compréhension sur l'application de la bioéconomie circulaire dans la PBP, dont l'activité principale de transformation est la valorisation de la betterave sucrière (cristallisation, distillation etc.), en analysant les conséquences décisionnelles à travers une approche institutionnelle et une étude des systèmes complexes territorialisés. La question de recherche abordée est celle de la manière dont le territoire, les institutions et les trajectoires préconçues influencent les décisions des acteurs dans l'évolution des SIU entre les plateformes de la bioéconomie. Pour mieux y répondre, nous faisons appel à une méthodologie capable de relier les flux biophysiques et l'impact des décisions prises par les acteurs dans la résolution de problèmes d'action collective.

L'un des exemples les plus aboutis de bioéconomie circulaire est sans doute la SIU, qui identifie et analyse les liens entre les acteurs cherchant à renforcer la circularité sur un territoire. Et ce par l'équilibre entre : une efficacité environnementale des technologies de production et de distribution (zéro déchet, empreinte carbone), une valorisation économique des produits et coproduits biosourcés (CO<sub>2</sub>, responsabilité sociale des entreprises, etc.) et une résilience aux chocs (climatiques, politiques, économiques). La SIU va donc permettre d'explicitier ainsi que de prévoir le périmètre et le comportement des acteurs, les différentes formes de collaboration entre ces acteurs et les évolutions du système. L'acteur d'ancrage, *anchor tenant* (Chertow, 2007 ; Onita, 2006), de la bioraffinerie est la sucrerie Cristal Union, en partenariat avec Vivescia/Bléanol, la coopérative céréalière agricole qui assure le stockage du blé dans les silos. De plus, des acteurs secondaires, dans le giron des deux sociétés coopératives précédemment évoquées, contribuent à la réussite de la SIU : la distillerie Cristanol (Cristal Union), l'amidonnerie-glucoserie Chamtor, l'actuelle Cérésia (issue de la fusion entre Acolyance et Cerena) et le groupe Champagne Céréales (Vivescia).

## CADRE THÉORIQUE DE LA SYMBIOSE DANS LA BIORAFFINERIE

Le cadre théorique auquel nous faisons appel pour expliquer la mise en œuvre de l'économie circulaire dans le contexte de la bioéconomie comprend la théorie adaptative institutionnelle (Baas & Boons, 2004 ; Decouzon, Maillefert, Petit & Sarran, 2015 ; Ostrom & Basurto, 2011) et la théorie des systèmes complexes. Elles cherchent, respectivement, à saisir les conséquences structurales, sur le marché, du passage conceptuel de déchet à coproduit et à expliquer les effets systémiques positifs et négatifs des boucles de rétroaction qui déterminent la gouvernance du système.

### **Du déchet au coproduit, une analyse institutionnelle de cette transition**

Du point de vue théorique, le déchet est alors le produit du processus de production qui fait partie d'un réseau de production dont il est extrait pour passer dans un réseau d'échanges et entrer finalement dans un réseau de consommation (Callon, 2016). Le marché agit alors comme l'interface qui conçoit, évalue et réglemente la marchandisation des déchets. Les acteurs de la PBP insistent sur l'usage de la notion de coproduit plutôt que celle de déchet. Ce glissement sémantique déclenche l'intégration du processus de production de coproduits comme un élément composant du système ►



<sup>2</sup>La marchandise fait référence à un produit qui peut être acheté et vendu.

productif. En effet, par définition, le déchet doit être éliminé, notamment par la mise en place de procédés plus efficaces pour lutter contre le gaspillage. Au contraire, le coproduit ne doit pas être éliminé mais bouclé dans le processus de production en vue d'augmenter sa rentabilité. Ainsi, lorsque les déchets se transforment en coproduits, il émerge le besoin d'une interface relationnelle où les agents économiques peuvent coopérer ou rivaliser selon les règles du marché (constitutives, collectives et opérationnelles ; Ostrom & Basurto, 2011). Lorsque l'on réfléchit en termes de coproduits, le processus de marchandisation<sup>2</sup> se déroule en même temps que cette mutation. Néanmoins, mis à part des études sur certains sujets éthiques tels que la consommation excessive, les économistes sont restés à l'écart de toute analyse systématique de la valorisation des déchets et de leur réintégration dans les processus productifs comme des relations institutionnelles et des comportements vis-à-vis du développement durable.

Les institutions sont présentées comme les outils économiques auxquels nous avons accès afin de traiter les problèmes d'action collective. Par conséquent, les parties prenantes interconnectées grâce à ces institutions sont les mieux placées pour décrypter cette relation. La transformation du déchet en coproduit se déroule à deux niveaux. D'une part, elle peut être développée au niveau de l'unité de production, ce qui est très proche de ce qui a été réalisé au moment du développement de la raffinerie pétrolière au tournant des années 30 (Galambos, Hikino & Zamagni, 2007 ; Benninga, 1990) : la matière première est utilisée pour une production principale, puis les coproduits sont réutilisés pour d'autres productions, visant à assurer la rentabilité de l'unité de production. D'autre part, cette transformation peut être déployée à l'échelle d'un site industriel dans le cadre d'une SIU. Dans ce cas, la PBP, tout comme la bioraffinerie de la région Nord Fluminense au Brésil (Santos & Magrini, 2018) ou celle de Wanze en Belgique, en est un exemple représentatif.

### **La bioraffinerie : une institution de coordination**

Les bioraffineries sont alimentées en matières premières par des coproduits agricoles (ou déchets) et d'autres coproduits comme la vapeur, les résidus, etc., qui sont utilisés par des entreprises environnantes installées à proximité en raison de la disponibilité de ces ressources. À ce titre, la PBP est un cas exemplaire de mise en œuvre d'une SIU, dont le développement, notamment entrepreneurial, s'appuie sur la disponibilité des ressources agricoles en amont (coopératives agricoles) et en aval (coproduits) de sa production (Bouteiller, Thénot & Lescieux-Katir, 2018 ; Domenech, Bleischwitz, Doranova, Panayotopoulos & Roman, 2019 ; Thénot, Bouteiller & Lescieux-Katir, 2018 ; Thénot & Honorine, 2017).

La bioraffinerie est à la fois une unité de production et une institution de coordination pour les acteurs dans l'organisation de l'action collective au sein de la SIU (Ostrom & Basurto, 2011 ; Callon, 2016 ; Roggero et al., 2018). En effet, afin de se coordonner, les acteurs de la SIU vont devoir mettre en place des procédures décisionnelles collectives, de choix d'allocation et de règles d'accès aux ressources, etc.

Trois contraintes participent à définir la dépendance à la trajectoire historique des acteurs de la PBP : 1. La position occupée par les acteurs au sein de la SIU ; 2. Les acteurs sont ►

soumis au contexte réglementaire et institutionnel dans lequel ils évoluent ; 3. Les acteurs sont soumis à l'incertitude des chocs extérieurs. D'après la première contrainte, ce sont les acteurs les plus puissants qui auront la capacité d'imposer des règles d'allocation des ressources en fonction des types de production visés. La SIU va s'organiser autour de ces agents dont l'intérêt est de maîtriser l'organisation des flux et des ressources. Puis, d'après la deuxième contrainte, les acteurs seront obligés de jongler avec une classification normative complexe qui privilégie l'arbitrage et un niveau de responsabilité augmentant l'incertitude de leur activité. Par exemple, les bioraffineries en France ont vécu la réduction des taux d'incorporation de biocarburants comme une remise en cause de leur modèle. Enfin, les acteurs sont soumis à l'incertitude des chocs extérieurs liés notamment au cours des matières premières (agricoles et pétrolières), aux effets du changement climatique sur la production agricole, à la réorientation des matières premières agricoles vers d'autres productions ou encore à la réduction de la quantité de déchets disponibles sous l'effet des politiques de diminution des déchets.

La PBP présente l'exemple indiscutable d'une démarche en bioéconomie qui en même temps s'érige comme une expérience aboutie de SIU. Elle rassemble dix acteurs parmi lesquels Vivescia/Blétanol, Cristal Union, Cristanol, Chamtor, Givaudan Active Beauty, Wheatoleo, Air Liquide, Européenne de Biomasse, un centre de recherche industrielle (Agro-industrie recherches développement, ARD) et un centre de recherche académique (Centre européen de biotechnologies et de bioéconomie, CEBB). Sur l'axe betteravier de la plateforme, nous avons donc :

- des produits, qui comprennent les jus verts et les sirops qui aboutiront, à la suite d'un processus de cristallisation ou de distillation, à des produits tels que le sucre, l'alcool et le bioéthanol ;
- des coproduits issus de la transformation, qui comprennent l'eau résiduelle, les pulpes surpressées, les sables et les cailloux, des écumes de siroperie, le sirop de basse pureté issu de la cristallisation, les vinasses et le CO<sub>2</sub> résultant de la distillation et de la cristallisation.

Ces coproduits sont ici tous réutilisés : l'eau d'évaporation pour laver et râper les betteraves, le sirop de basse pureté pour être distillé en alcool ou en bioéthanol, le CO<sub>2</sub> pour gazéifier des boissons, les pulpes surpressées pour l'alimentation animale, les sables et les cailloux pour la stabilisation des routes en milieu rural et, enfin, les écumes de siroperie ainsi que la vinasse de distillerie sont réemployées dans l'amendement des sols.

### **Les effets rebond, une analyse systémique causale**

Trois théories composent l'analyse systémique causale, à travers lesquelles nous expliquons les effets secondaires négatifs, les avantages connexes, les effets d'entraînement et les compromis générés par les relations sociales complexes : la théorie de la proximité, la théorie des systèmes adaptatifs complexes et la théorie des écosystèmes.

L'économie géographique, définie ici comme l'effort coordonné d'optimisation des ressources territoriales, économiques et politiques, est essentielle à la compréhension ►

d'une structure de SIU fonctionnelle ; en conséquence, la proximité géographique devient une variable pertinente pour orienter l'analyse de l'écosystème agro-industriel d'une bioraffinerie. L'approche géographique englobe deux dimensions complémentaires : la proximité géographique, c'est-à-dire la distance cartésienne, et la proximité organisationnelle/institutionnelle, qui fait référence au réseau de relations au-delà de l'espace physique (Beurain & Brullot, 2011).

La théorie des systèmes adaptatifs complexes cherche à articuler des disciplines qui étaient auparavant déconnectées, non parce qu'elle veut rassembler toutes les connaissances mais parce que la complexité implique la reconnaissance de l'incertitude (Miller & Page, 2007). La pensée complexe (Patrucco, 2011) met en évidence deux caractéristiques : 1. Le tout ne peut pas être réduit à la somme des parties ; 2. La complexité introduit la notion de dualisme équilibre/instabilité, ce qui suggère qu'il existe un déséquilibre dans les flux de l'environnement et qu'une perturbation organisationnelle pourrait provoquer la dégradation du système. L'idée d'un système ouvert, hors équilibre, évoluant vers un dynamisme stabilisé pourrait créer le consensus nécessaire pour intégrer la complexité à nos réflexions à travers la théorie des écosystèmes.

Enfin, la théorie des écosystèmes bénéficie d'une reconnaissance croissante dans la communauté académique en apportant la preuve de ses avantages (Morales, Diemer, Cervantes & Carrillo-González, 2019 ; Nielsen, 2007 ; Tsujimoto, Kajikawa, Tomita & Matsumoto, 2018) grâce à cinq postulats issus de la littérature scientifique : 1. La théorie des écosystèmes analyse les réseaux organiques, en présentant également les caractéristiques comprises comme opposées à la coopération : compétition trophique, déprédation, parasitisme et destruction de l'écosystème ; 2. Elle reconnaît la diversité des acteurs avec leurs attributs, leurs motivations et leurs objectifs propres qui déterminent la rationalité de leurs décisions ; 3. Elle encadre les limites rationnelles de l'écosystème sur les chaînes d'approvisionnement des produits/services ; 4. L'évolution dynamique des écosystèmes est nécessaire dans le temps ; 5. L'identification des schémas comportementaux et décisionnels a une influence sur la durabilité ou sur la crise de l'écosystème en lui-même.

## MÉTHODOLOGIE

La dynamique des systèmes est une méthodologie développée pour l'étude de problèmes non linéaires complexes émanant du comportement des systèmes eux-mêmes, capable d'intégrer, de supprimer ou de modifier les mécanismes structurels entre les acteurs et leurs périodes d'inactivité. La publication de livres comme *Industrial Dynamics* (Forrester, 1961), *Urban Dynamics* (Forrester, 1969) et *The Limits to Growth* (Meadows, Meadows, Randers & Behrens, 1972) a stimulé la traditionnelle utilisation de la dynamique des systèmes dans l'analyse des problèmes complexes en incorporant des concepts tels que les boucles de rétroaction, les stocks et les délais, dans une approche dynamique cadre. ►

Pour faire face aux modèles de comportement complexe, l'intégration de la proximité géographique dans la méthodologie de la dynamique des systèmes nous semble tout à fait cohérente. Elle est censée analyser et interpréter les relations de causalité entre les parties prenantes, mieux comprendre les décisions d'allocation des ressources et les seuils d'action collective qui ont un impact sur les prises de position façonnant le système agro-industriel futur. Le diagramme des stocks et des flux (cf. figure 2) permet une évaluation quantitative des écosystèmes industriels, incluant ainsi le modèle de simulation de scénarios. La dynamique des systèmes géographiques aborde des problèmes complexes décrivant les conséquences comportementales des accords entre les parties prenantes qui peuvent sembler contre-intuitives dans le modèle. Elle fournit en outre des informations sur les entrées et les sorties, mais également sur les stocks d'un système, laissant ainsi la place au développement de scénarios qui explorent les points d'amélioration potentielle de l'écosystème agro-industriel. Parmi ses atouts principaux, on peut énumérer :

- le comblement du manque d'études à une échelle micro, en analysant le comportement social des acteurs et des institutions, déterminé par la structure sociale privée/publique ;
- l'intégration de la dimension territoriale et sociale ;
- l'introduction de la complexité dans l'analyse sociale de l'information grâce aux systèmes géographiques dynamiques.

Pour cette étude de cas, nous avons utilisé des données provenant de sources secondaires publiques qui comprennent : 1. Les rapports institutionnels et les plans d'action ; 2. Les communications officielles des acteurs de la municipalité et de la région ; 3. La littérature académique en anglais et en français sur la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle, qui englobe différentes perspectives en abordant plusieurs problématiques. Nous avons ensuite validé les données en interrogeant des consultants dotés d'une grande connaissance de la bioraffinerie étudiée. Parmi les rapports institutionnels et les plans d'action analysés, nous pouvons citer : la feuille de route pour l'économie circulaire (ministère de la Transition écologique et solidaire, 2018) ; le *Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France* (ADEME & ARF, 2014) ; dans la collection Références, *Écologie industrielle et territoriale : le guide pour agir dans les territoires* (Commissariat général au développement durable, 2014) ; le rapport *Une stratégie bioéconomie pour la France. Plan d'action 2018-2020* (ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, 2018) et le mémento *Économie de proximité, économie circulaire et écologie industrielle et territoriale* (France Clusters, 2018).

La dynamique des systèmes géographiques inclut les deux approches théoriques mentionnées précédemment dans le cadre théorique : la théorie institutionnelle et la théorie des systèmes. Il est important de bien définir le socle théorique d'une méthodologie qui, selon nous, n'a jamais été utilisée pour analyser les symbioses industrielles, hormis dans l'étude publiée par Morales et Diemer (2019). La méthodologie de la dynamique des systèmes géographiques tente de représenter des modèles mentaux territoriaux sur un écosystème agro-industriel local comme la bioraffinerie. ►

## DISCUSSION

Nous avons identifié la bioraffinerie (Santos & Magrini, 2018) comme un écosystème porteur d'un potentiel en matière de développement durable (cet écosystème se situe au carrefour des zones urbaines et rurales). Dans cette étude, nous partons du fait qu'en associant la bioraffinerie et le concept de SIU l'écosystème agro-industriel betteravier et ses institutions européennes, nationales et locales peuvent s'intégrer dans l'analyse de la valorisation de coproduits. L'un des apports principaux de la dynamique des systèmes territoriaux à l'analyse de la PBP est l'identification des enjeux susceptibles de provoquer des changements structurels à grande échelle, de petits ajustements qui déclenchent une sorte d'effet multiplicateur.

### Politique européenne et arbitrage en quête d'une économie circulaire

Sur la base d'une analyse approfondie, nous avons convenu que les directives pour la gestion des déchets en Europe et en France sont déterminées majoritairement par une hiérarchisation inscrite sur la feuille de route liée à ce sujet (Gregson, Crang, Fuller & Holmes, 2015). Cette hiérarchisation ne correspond pas au critère territorial et ne représente donc pas la réalité sociale et environnementale des secteurs géographiques. Les trois catégories, énoncées dans un ordre décroissant, sont : 1) prévention des déchets ; 2) récupération pour réutilisation et recyclage de produits de fin de cycle de vie ; 3) valorisation de déchets et échanges de coproduits en amont et en aval.

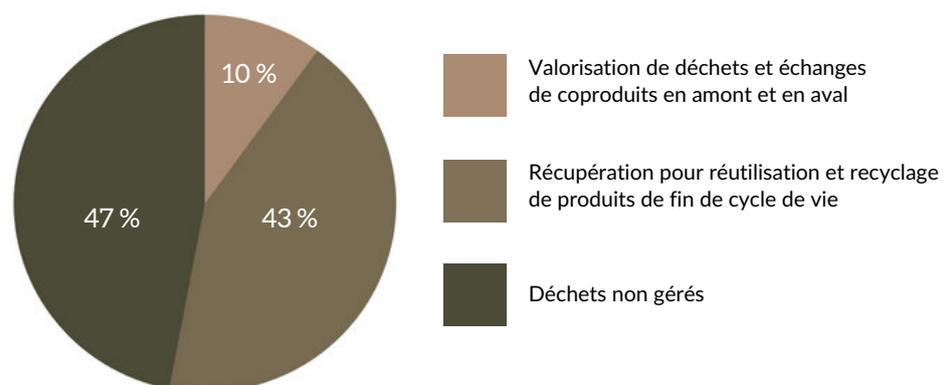


Figure 1. Composition de la gestion des déchets en Europe en 2014.  
Sources : Eurostat, 2019 ; Hoornweg et al., 2015 ; Mayer et al., 2019.

La figure 1 ci-dessus n'illustre pas la prévention des déchets ; celle-ci a été analysée en fonction de la prolongation de la durée de vie à travers une enquête menée en 2008 auprès de 36 des plus grands fabricants d'électronique de Chine, qui n'a révélé que peu de preuves de la conception écologique de leurs produits (Gregson et al., 2015). Le taux de 43 % de déchets solides urbains en Europe en 2014 récupérés pour la réutilisation et le recyclage de produits en fin de cycle de vie (après consommation) a été calculé par un réseau mondial de recyclage et de valorisation énergétique (Hoornweg et al., 2015). La valorisation de déchets et les échanges de coproduits en amont ou en aval, y compris dans le secteur de la bioéconomie, sont mesurés grâce au taux cyclique socio-économique (ISCr). La proportion de matières secondaires parmi les matières traitées est ainsi de 9,6 % en Europe (Europe des vingt-huit) en 2014 (Mayer, Haas, Wiedenhofer, Krausmann, Nuss & Blengini, 2019). ►

Pour intégrer le changement adaptatif institutionnel à notre méthodologie, nous avons insisté sur la définition du rôle des acteurs de la SIU dans une région de forte tradition agricole et agro-industrielle comme celle de Bazancourt-Pomacle. Trois scénarios ont été modélisés pour intégrer les données quantitatives et qualitatives qui nous ont permis de mieux comprendre les bénéfices potentiels : le scénario de référence ; l'évolution du portefeuille de valorisation de la betterave sucrière ; le scénario de la diminution de la production de betterave sucrière à cause des intempéries, des risques climatiques ou de décisions politico-économiques.

### Leviers de la valorisation de coproduits issus de la betterave sucrière

Nous nous appuyons sur l'étude du cas de la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle pour déterminer le rôle de l'analyse géographique dans le domaine de la SIU, et ce en identifiant les boucles de rétroaction qui renforcent ou qui régulent la durabilité prise en compte au sein d'une région à forte tradition agricole et agro-industrielle.

Les conditions initiales, dans le modèle de la PBP, supposent que l'utilisation de la betterave représente 67 % de la production agricole du département de la Marne en 2017 (Agreste, 2019), qui compte 3 millions de tonnes en 2014 (Commissariat général au développement durable, 2014). Compte tenu de ce chiffre, la production totale estimée pour 2017 est de 3,36 millions de tonnes, ce qui représente 2,25 millions de betteraves sucrières transformés sur le site. La surface betteravière cultivée dans la Marne a augmenté annuellement de 3 % entre 2007 et 2017, avec une variabilité de -3 % à +8 %. À l'heure actuelle, la PBP présente une capacité de stockage de 672 000 tonnes de betterave, soit environ 30 % de la production annuelle. Les simulations du système reposent sur des hypothèses du modèle (cf. tableau 1 page suivante) reliant les fondements théoriques du modèle avec les conditions initiales. ►

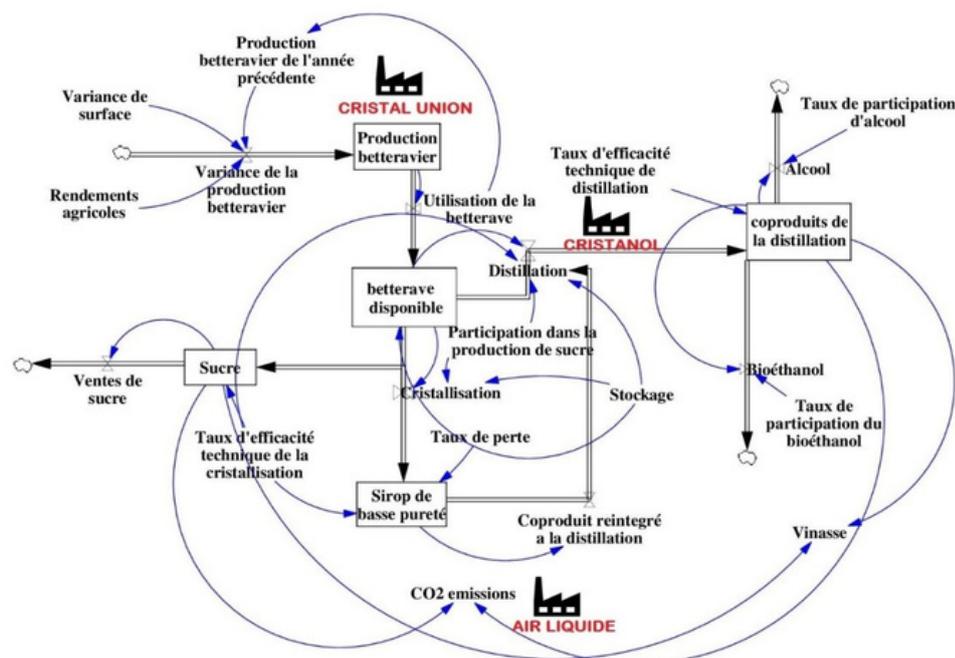


Figure 2. Diagramme de flux et de stocks du système agro-industriel de la bioraffinerie Bazancourt-Pomacle. Développé par l'auteur avec le logiciel Vensim PLE.

Tableau 1. Les hypothèses du modèle.

	<b>HYPOTHÈSES SUR LA PRODUCTION DE BETTERAVE</b>	Les rendements agricoles de la betterave sur la PBP ont grimpé de 1 % par an sur la période, avec une variabilité de -26 % à +18 %.
	<b>HYPOTHÈSES SUR LES UTILISATIONS DES BETTERAVES</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La moitié des betteraves disponibles est destinée à la production de sucre, l'autre moitié à la production d'alcool et de bioéthanol sur la PBP.</li> <li>2. Le taux d'efficacité technique de cristallisation est de 13 %, ce qui représente le volume de betterave susceptible d'être transformé en jus vert.</li> <li>3. 19 % de ces jus verts seraient de basse qualité, donc inadaptés à l'alimentation humaine.</li> <li>4. Le taux d'efficacité technique de distillation est de 6 % et représente le volume de betterave transformé en volume d'alcool.</li> </ol>
	<b>HYPOTHÈSES SUR LA PRODUCTION DE COPRODUITS</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La production de sirop de basse pureté est estimée à 54 600 t, et le stock de coproduits de la distillation fixé à 101 929 t (y compris les betteraves disponibles directement destinées à la distillation).</li> <li>2. Le taux d'émission de CO<sub>2</sub> à partir du sucre est de 45 % du volume total de sucre.</li> <li>3. Le taux d'émission de CO<sub>2</sub> à partir du sirop de basse pureté destiné à la distillation est de 25 % de son volume total.</li> <li>4. Le taux de production de vinasse à partir du sucre est de 6,5 %.</li> <li>5. Le taux de production de vinasse à partir du sirop de basse pureté est de 5 %.</li> </ol>
	<b>HYPOTHÈSES DE BOUCLE DE RÉTROACTION (DITE DE RÉGULATION OU D'AMPLIFICATION)</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Le sirop de basse pureté résultant de la cristallisation est un coproduit réintégré comme <i>input</i> de la distillation.</li> <li>2. Le CO<sub>2</sub> récolté comme coproduit de la cristallisation et de la distillation est réutilisé par Air Liquide.</li> </ol>
	<b>HYPOTHÈSES SUR LES DÉLAIS ENTRE LES DÉCISIONS ET LEURS EFFETS</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. La superficie de plantation est décidée bien avant la récolte, basée sur l'information de l'année précédente.</li> <li>2. Il n'y a pas de stock de sucre dans le modèle, les ventes du sucre sont égales au sucre produit.</li> </ol>

Sur la figure 2 (p. 63), les stocks sont symbolisés par des rectangles avec, par exemple, le stock de betteraves disponibles. Les flèches droites et blanches représentent des processus (production, utilisation, vente) qui déterminent les stocks de produits et de coproduits. Ainsi, le stock de sucre va être influencé par le stock de l'année précédente et par la production de l'année courante. Par exemple, la production de sucre de l'année courante va dépendre du taux d'efficacité technique de la cristallisation des sirops. Les technologies disponibles et leur efficacité sont symbolisées par des taux de niveaux représentés par les flèches noires doubles qui se relient avec le symbole suivant  $\Delta$ , et qui peuvent évoluer dans le temps.

Enfin, les variables qui influencent les taux de niveaux sont illustrées par les flèches incurvées bleues. Le stock est l'accumulation de l'incrément dans un certain délai (un an dans ce cas), et le taux de niveaux désigne l'évolution des flux dans le temps, tels que les coproduits réintégrés à la distillation. La flèche discontinue représente les relations causales qui ont été identifiées sur le terrain mais que l'on n'a pas réussi à modéliser par manque de données accessibles, à savoir celles concernant la vinasse qui vient augmenter les rendements agricoles. Si les données sont disponibles, ce modèle pourra être étendu en termes d'acteurs, de relations et de règles, pour ce qui à trait à la biomasse, aux produits et aux coproduits.

Le modèle va dépendre des conditions des années antérieures (stocks), de celles de l'année en cours (flux) et des décisions d'allocation des acteurs (taux de niveaux) de la SIU. C'est pour cela qu'après avoir fait les hypothèses structurant le modèle il faut spécifier les équations qui vont permettre la modélisation du système en 2017 pour analyser ses trajectoires jusqu'en 2027.

## RÉSULTATS

Intégrer des variables telles que l'évolution du portefeuille de valorisation de la betterave sucrière – matérialisée par la décision de produire du bioéthanol ou de l'alcool au lieu du sucre – permet de mieux comprendre les échanges biophysiques de coproduits qui se succèdent au sein de la SIU. Cette étude peut encourager les réglementations actuelles en matière d'économie circulaire et aboutir à des accords multisectoriels qui pourront mieux contribuer à la résilience territoriale, car cette méthodologie est capable d'intégrer la rationalité systémique causale de la PBP dans une échelle d'analyse méso.

C'est grâce à l'information fournie par les simulations que nous pouvons mieux gérer la complexité d'un écosystème agro-industriel comme celui de la PBP, à partir d'un arbitrage rationnel pour valoriser les coproduits issus de la biomasse. Par contre, le même écosystème agro-industriel est soumis aussi à une série de contraintes techniques et de variables exogènes à caractère politique ou économique, sur laquelle il n'a aucune possibilité d'interférence, tels le prix du marché international ou les politiques agricoles européennes. Le fait de pouvoir différencier les variables exogènes du modèle de celles endogènes est un avantage pour la gestion interne du système local. Il est en effet possible de simuler différents scénarios causals déterminés par ces variables exogènes que nous ne pouvons ►

influencer au sein de l'écosystème local. Néanmoins, il reste envisageable de tester les effets et les impacts des décisions socio-économiques sur lesquelles les acteurs de l'écosystème peuvent agir de façon proactive. Par exemple, le modèle – issu de l'évolution du portefeuille de valorisation de la betterave sucrière vers des procédés d'une plus haute valeur ajoutée – nous montre que la tendance à la réduction du stock et de la production de betterave sucrière disponible est un effet causal de cette valorisation.

Trois scénarios ont été retenus afin de faire tourner le modèle et de pouvoir projeter les trajectoires de l'écosystème betteravier de la PBP sur la période 2017 à 2027 :

- scénario 1 (de référence) : les conditions de départ de 2017 se maintiennent avec les mêmes comportements jusqu'en 2027 ;
- scénario 2 : la répartition de la valorisation en sucre/alcool passe de 50 %/50 % à 30 %/70 %, avec une augmentation annuelle de la superficie cultivée de 6 %, résultat d'une décision de spécialisation dans les procédés de distillation à plus haute valeur ajoutée. Cela permet, par exemple, de simuler les conséquences de ce choix face à une chute des prix du sucre ;
- scénario 3 : il reprend les hypothèses du scénario 2, en en ajoutant une liée à une baisse annuelle de la production betteravière de 5 %, plus faible que les fluctuations de plus de 15 % constatées en France entre 2010, 2011 et 2012. Cela modélise l'impact du changement climatique, caractérisé par des pluies ou des sécheresses extrêmes.

Les résultats des différents scénarios sont représentés sur la figure 3 ci-dessous.

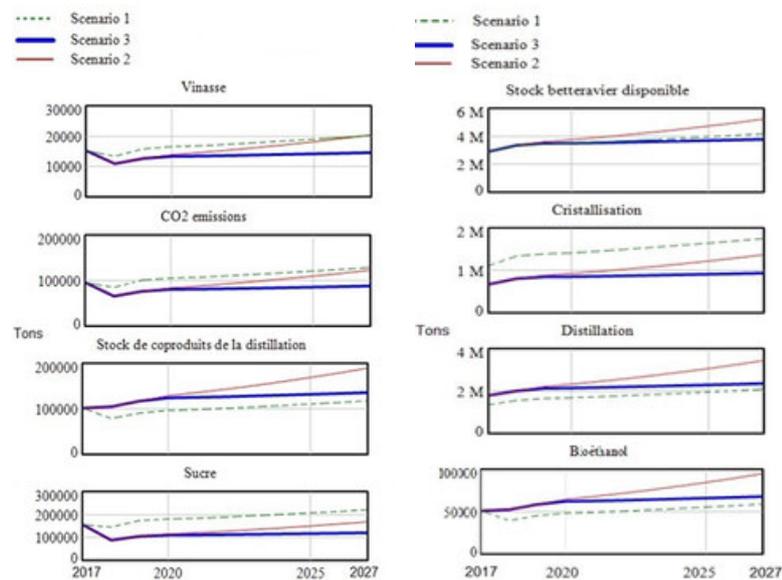


Figure 3. Simulation de scénarios avec une compréhension systémique de la bioraffinerie. Développé par l'auteur avec le logiciel Vensim PLE.

La ligne en pointillé (verte) montre la trajectoire dans le scénario de référence, qui illustre la stabilité du système et qui rime avec une augmentation modérée du sucre et de bio-éthanol. La ligne fine et continue (rouge) souligne l'augmentation du stock betteravier et la baisse relative de la production de sucre. Le décalage du point d'origine de la distillation ►

et de la cristallisation par rapport au scénario de référence est dû au fait que la transition du mix de répartition entre production de sucre et d'alcool est effective dès l'instant où la décision d'allocation est prise. Nous avons aussi une baisse à court terme de la production de vinasse et de CO<sub>2</sub>, dont les niveaux se redressent à long terme. Cette évolution risque d'entraîner une crise temporaire dans la réutilisation du CO<sub>2</sub> par Air Liquide et dans celle de la vinasse pour amender les sols.

La ligne en gras et continue (en bleu) révèle un niveau de stock betteravier similaire à celui du scénario de référence, mais aussi une stagnation de la production de sucre et de bioéthanol. Cela nous amène à croire qu'un mix de production qui privilégie fortement la distillation de la biomasse betteravière par rapport à la production de sucre devient plus vulnérable à long terme car, en se concentrant d'avantage sur le bioéthanol et l'alcool, la plateforme serait soumise aux aléas d'un marché moins diversifié. Nos résultats suggèrent que les décisions d'investissement dans la distillerie aboutissent à une réduction de la production de sucre, avec pour conséquence une diminution de coproduits potentiellement réutilisables et valorisables via les synergies de la PBP, ce qui peut mettre en péril celles issues de la valorisation des coproduits de la betterave.

## CONCLUSION

La façon dont les principes de l'écologie industrielle fonctionnent dans un contexte bioéconomique est complexe. Pour les internaliser et les opérationnaliser, nous avons fait appel à la dynamique des systèmes territoriaux. Elle seule est capable de gérer la complexité et d'intégrer les effets des comportements des acteurs. L'approche territoriale de la SIU favorise l'identification des intérêts et des valeurs qui gouvernent la structure de l'écosystème agroalimentaire, tel l'arbitrage rationnel collectif à travers ses différents intervenants. Elle nous permet aussi de découvrir l'influence biophysique et sociale des acteurs ainsi que leur impact sur l'émergence de la plateforme et sa durabilité. Dans cette étude, la compréhension fonctionnelle gagne en pertinence lorsqu'elle met en lumière les distorsions provoquées par les relations de puissance du marché à une échelle méso, comme par exemple la fin des quotas européens en 2017 ou l'évolution du portefeuille de valorisation des coproduits et des produits de la betterave sucrière, à la lumière de l'analyse des scénarios.

C'est grâce à ces simulations que nous constatons que l'équilibre du système est préservé quand il y a un arbitrage rationnel entre la valorisation des déchets organiques dans le champ d'action de la bioéconomie (énergie biosourcée, biomolécules, produits issus de matières végétales, etc.) et la réintégration à la terre, à travers le compostage. Par contre, si l'écosystème agro-industriel est impacté par une des variables externes telles que la diminution de la production ou l'augmentation du rendement, qui réduisent le pourcentage de déchets organiques potentiellement valorisables pour la bioéconomie, il peut rendre le système très vulnérable. Une fois achevée, la dynamique des systèmes territoriaux devient un outil qui permet de fournir des informations sur les flux d'entrée et de sortie, sur les stocks du système et sur les scénarios propices à l'amélioration des ►

performances de l'écosystème agro-industriel. Elle aide à mieux comprendre le rôle du territoire dans les stratégies de bioéconomie circulaire et à proposer ainsi des recommandations en matière de politiques publiques. En conséquence, l'analyse territoriale des systèmes dynamiques contribue à surmonter les pratiques routinières issues d'une dépendance historique (par exemple, les pratiques d'investissement en éco-efficience qui entraînent une diminution significative des coproduits valorisables à travers les synergies).

En termes de robustesse et de validité, cette étude n'est pas exempte de critiques liées à la méthode de recherche. Les idées collectées à la lecture de la littérature ne sont pas directement transférables à la SIU. La phase de validation n'a pas encore débuté, donc la comparabilité des résultats avec d'autres études ainsi que la généralisation des conclusions sont discutables. Cependant, l'originalité de cette méthode peut concourir à une meilleure compréhension du rôle du territoire dans la stratégie de SIU de la bioéconomie, qui peut ainsi être évalué avec des indicateurs structurels et territorialisés du développement durable. La particularité de la dynamique des systèmes géographiques réside dans la richesse des références et des informations qualitatives recueillies, structurées de manière systémique et reproductibles. ► ◀



Figure 4. Centre européen de biotechnologie et de bioéconomie, au sein de la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle. © Manuel E. Morales.

## RÉFÉRENCES

ADEME & ARF. (2014, octobre). Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France.

Agreste. (2019, 18 juin). Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

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*, 12(8-10), 1073-1085.

- Beaurain, C., & Brullot, S. (2011). L'écologie industrielle comme processus de développement territorial : une lecture par proximité. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, avril(2), 313-340.
- Benninga, H. (1990). *A History of Lactic Acid Making. A Chapter in the history of Biotechnology*. Kluwer Academic Publishers.
- Bouteiller, C., Thénot, M., & Lescieux-Katir, H. (2018). Capitalisme patient et symbiose industrielle : le cas d'une bioraffinerie territorialisée. *Économie rurale*, 363, 121-139.
- Callon, M. (2016). Revisiting marketization: from interface-markets to market-agencements. *Consumption Markets & Culture*, 19(1), 17-37.
- Chertow, M. R. (2007). "Uncovering" Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 11-30.
- Commissariat général au développement durable. (2014, décembre). *Écologie industrielle et territoriale : le guide pour agir dans les territoires*. Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.
- Daly, H. E. (1991). Towards an Environmental Macroeconomics. *Land Economics*, 67(2), 255-259.
- Decouzon, C., Maillefert, M., Petit, O., & Sarran, A. (2015). Arrangements institutionnels et écologie industrielle. *Revue d'économie industrielle*, 152, 151-172.
- Diemer, A. (2016). Les symbioses industrielles : un nouveau champ d'analyse pour l'économie industrielle. *Innovations*, 50(2), 65-94.
- Diemer, A., & Morales, M. E. (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*, 4, 52-71.
- 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*, 141, 76-98.
- Forrester, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. MIT Press.
- Forrester, J. W. (1969). *Urban Dynamics*. MIT Press.
- France Clusters. (2018, novembre). *Économie de proximité, économie circulaire et écologie industrielle et territoriale*.

- Fuentes-Saguar, P. D., Mainar-Causapé, A. J., & Ferrari, E. (2017). The Role of Bioeconomy Sectors and Natural Resources in EU Economies: A Social Accounting Matrix-Based Analysis Approach. *Sustainability*, 9(12), 2383.
- Galambos, L., Hikino, T., & Zamagni, V. (2007). *The Global Chemical Industry in the Age of the Petrochemical Revolution*. Cambridge University Press.
- Germont, S. (2019). Dossier de candidature à l'appel à projets du Programme d'investissement d'avenir. Action « Territoires d'innovation ».
- Gregson, N., Crang, M., Fuller, S., & Holmes, H. (2015). Interrogating the circular economy: the moral economy of resource recovery in the EU. *Economy and Society*, 44(2), 218-243.
- Hertwich, E. G. (2005). Consumption and the Rebound Effect: An Industrial Ecology Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 9(1-2), 85-98.
- Hoorweg, D., Bhada-Tata, P., & Kennedy, C. (2015). Peak Waste: When Is It Likely to Occur? *Journal of Industrial Ecology*, 19(1), 117-128.
- Kasmi, F. (2018). The “eco-innovative” milieu. Industrial ecology and diversification of territorial economy. *Technologie et innovation*, 3.
- Kennedy, C., Baker, L., Dhakal, S., & Ramaswami, A. (2012). Sustainable Urban Systems: An Integrated Approach. *Journal of Industrial Ecology*, 16(6), 775-779.
- Mayer, A., Haas, W., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Nuss, P., & Blengini, G. A. (2019). Measuring Progress towards a Circular Economy : A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 62-76.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens III, W. W. (1972). *The Limits to Growth. A Report for the Club of Rome's project on the Predicament of Mankind*. Universe Books.
- Miller, J. H., & Page, S. E. (2007). *Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life*. Princeton University Press.
- Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. (2018, février). *Une stratégie bioéconomie pour la France. Plan d'action 2018-2020*.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2018, avril). *Feuille de route pour l'économie circulaire*.
- Morales, E. M., Diemer, A., Cervantes, G., & Carrillo-González, 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*, 140, 235-245.

- Morales, M., & Diemer, A. (2019). Industrial Symbiosis Dynamics, a Strategy to Accomplish Complex Analysis : The Dunkirk Case Study. *Sustainability*, 11(7), 1971.
- 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*, 15(17), 1639-1653.
- Onita, J. A. (2006). *How does industrial symbiosis influence environmental performance?* [Mémoire de master, Linköpings universitet]. Diva-portal.org
- Ostrom, E., & Basurto, X. (2011). Crafting analytical tools to study institutional change. *Journal of Institutional Economics*, 7(3), 317-343.
- Patrucco, P. P. (2011). Changing network structure in the organization of knowledge: the innovation platform in the evidence of the automobile system in Turin. *Economics of Innovation and New Technology*, 20(5), 477-493.
- Roggero, M., Bisaro, A., & Villamayor-Tomas, S. (2018). Institutions in the climate adaptation literature: A systematic literature review through the lens of the Institutional Analysis and Development framework. *Journal of Institutional Economics*, 14(3), 423-448.
- Roseland, M. (1997). Dimensions of the eco-city. *Cities*, 14(4), 197-202.
- Santos, V. E. N., & Magrini, A. (2018). Biorefining and industrial symbiosis: A proposal for regional development in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 177, 19-33.
- Taddeo, R., Simboli, A., Morgante, A., & Erkman, S. (2017). The Development of Industrial Symbiosis in Existing Contexts. Experiences From Three Italian Clusters. *Ecological Economics*, 139, 55-67.
- Thénot, M., Bouteiller, C., & Lescieux-Katir, H. (2018). Des coopératives agricoles agents de symbiose industrielle : Étude de la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle (Marne, France). *RECMA*, 347(1), 31-47.
- Thénot, M., & Honorine, K. (2017). La bioéconomie industrielle à l'échelle d'une région : la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle, tremplin d'une stratégie territoriale. *Annales des Mines - Réalités industrielles*, février 2017(1), 66-70.
- Torre, A., & Zimmermann, J.-B. (2015). Des clusters aux écosystèmes industriels locaux. *Revue d'économie industrielle*, 152, 13-38.
- Tsujimoto, M., Kajikawa, Y., Tomita, J., & Matsumoto, Y. (2018). A review of the ecosystem concept-Towards coherent ecosystem design. *Technological Forecasting and Social Change*, 136, 49-58.