

Industrial symbiosis, a circular bioeconomy strategy: The sugar beet case study at the Bazancourt-Pomacle Platform

Manuel E. MORALES, Gemma CERVANTES

Chaire de Bioéconomie Industrielle, NEOMA Business School (Campus Reims), 59 Rue Pierre Taittinger, 51100 Reims, France

ABSTRACT

Industrial symbiosis (SI) is presented as an inter-firm innovation with the aim of biophysical flows optimization but also structural sustainability. In this paper, we introduce geographical system dynamics as the methodology used to analyse the Biorefinery using Stock and Flow Diagrams (SFD) to identify the actors/institutions and networks that represent the bottleneck of the technological and innovation change in the local Bioeconomy ecosystem. The institutional adaptive theory, the complex systems theory and the spatial economy encompass the theoretical framework that conceptualizes industrial symbiosis in the ground of circular bioeconomy, where the geographic system dynamics methodology helps to identify the innovation drivers. This methodology draws up three scenarios (baseline, change in the sugar-beet valorisation portfolio and decrease in sugar-beet productive efficiency) to illustrate the by-products valorisation (sugar green juice, low quality syrup, CO₂ and stillage) encompassing sustainable strategies that looks forward the enhancement of the agro-industrial ecosystem performance. We take for grant that Bazancourt-Pomacle platform holds the conditions to be considered an industrial symbiosis, in the sought of providing a better understanding of the stakeholder's causal effects and the complexity of their influence in the local industrial fiber regarding the sugar-beet valorisation alternatives.

Keywords: Bio-refinery, System dynamics, Proximity, Industrial ecology, Institutional change

RESUME

La symbiose industrielle se présente comme une stratégie inter-entreprises s'inscrivant dans une logique d'allocation efficient et résilient de ressources du système d'approvisionnement. La théorie de la proximité et la dynamique des systèmes constituent le socle théorique de la dynamique de systèmes territoriaux, comme méthodologie qui permet de se concentrer sur les boucles de rétroaction causale du procès d'innovation de la betterave sucrière pour ainsi parvenir à identifier les leviers et les obstacles institutionnels, les acteurs et l'évolution de leurs interactions dans un écosystème agroindustriel complexe. Ainsi, dans le papier on présente trois scénarios (référence, évolution du portefeuille de valorisation de la betterave à sucre et diminution de la production de betterave sucrière) pour mieux comprendre la valorisation betteravière (jus vert, sirop de basse pureté, CO₂ et vinasse) englobant les stratégies du développement durable qui poursuit une amélioration de la performance de cet écosystème agroindustriel de Bazancourt-Pomacle. On part du postulat que la Plateforme de Bazancourt-Pomacle (PBP) remplit toutes les conditions d'une SI, ce qui permet expliquer le rôle de l'analyse géographique, en identifiant les boucles qui renforcent ou régulent la durabilité sous-jacente d'une région ayant une forte tradition dans l'agriculture et l'agro-industrie. Cette étude vise à inciter une meilleure compréhension des effets causales déclenchés par les décisions prises par les acteurs et la complexité de leur influence dans l'écosystème agroindustriel local.

Mots clés : Bioraffinerie, dynamique des systèmes, proximité, économie circulaire

1. 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). Le concept de ville durable s'inscrit dans une quête de bien-être pour les citoyens à travers une approche globale de la planification et de la gestion urbaines visant à réduire ou valoriser les déchets et les émissions (Register, 1987). D'un point de vue systémique, une ville durable peut être décrite comme l'ensemble de 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. Les centres urbains et ses systèmes industriels et agroindustriels sont les principaux producteurs au monde de déchets solides (Hoornweg, Bhada-Tata, & Kennedy, 2015). De ce fait, pour lutter contre des enjeux globaux comme l'épuisement des matières premières ou/et la surproduction de déchets.

Les filières de recyclage ne sont pas à la hauteur du phénomène. 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 des processus de production. La réutilisation systématique des coproduits définit l'économie circulaire qui peut s'appliquer, à terme, à toutes les productions, y compris les plus polluantes et 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).

Dans cette attente, la bioéconomie agit dans le sous-système agroindustriel comme une alternative réaliste à une économie basée sur le carbone fossile (charbon, pétrole ou gaz) qui propose la transformation des ressources renouvelables afin de produire des biens

alimentaires et non-alimentaires, des molécules d'intérêt, de l'énergie, des biomatériaux et d'autres produits biosourcés (Fuentes-Saguar, Mainar-Causapé, & Ferrari, 2017; Sylvain Germont, 2019). Une bioéconomie circulaire est donc une bioéconomie produisant des procédés et produits innovants à partir de la biomasse végétale et animale mais dont les coproduits organiques, issus de l'agriculture, de l'industrie agroalimentaires, du bois, ou des traitements des déchets sont absorbés et valorisés par le système. La bioéconomie circulaire délaisse donc une logique verticale de filière, pour privilégier une vision systémique et circulaire dans laquelle est menée une gestion durable des ressources (Germont, S., 2019). Elle suppose une transformation des modes de production et de consommation dans les domaines de l'alimentation, l'énergie, les matériaux ainsi que les circuits économiques.

Afin de mettre en évidence les modes de fonctionnement d'une telle bioéconomie circulaire, nous proposons un modèle de simulation de la betterave sucrière sur la Plateforme de Bazancourt-Pomacle (PBP). Le modèle du système betteravier remplit les 3 conditions pour être considéré comme symbiose industrielle (SI): 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 de la symbiose (Diemer, 2016). La SI est un outil de l'écologie industrielle, 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).

L'un des exemples le plus abouti de bioéconomie circulaire est sans doute la SI qui identifie et analyse les liens entre les acteurs qui cherchent à renforcer la circularité sur un territoire en équilibrant : une efficacité environnementale des technologies de production et de distribution (i.e. zéro déchets, empreinte carbone), une valorisation économique des produits et coproduits biosourcés (i.e. le CO₂, responsabilité sociale des entreprises, etc.) et une

résilience aux chocs (i.e. climatiques, politiques, économiques). La SI va donc permettre d'explicitier et de prévoir le périmètre et le comportement des acteurs, les différentes formes de collaboration entre ces acteurs et les évolutions du système.

Cet article a pour objectif de fournir des éléments de compréhension sur l'application de la bioéconomie circulaire dans la PBP dont une activité de transformation principale est la valorisation de la betterave sucrière (cristallisation, distillation etc.) en analysant les conséquences décisionnelles à travers une approche institutionnelle et une analyse des systèmes complexes territorialisés. La question de recherche abordée est comment le territoire, les institutions et les trajectoires préconçues influencent les décisions des acteurs dans l'évolution des symbioses industrielles entre les plateformes de la bioéconomie. Pour mieux répondre à cette question, on fait 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 (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017 ; Saavedra, Iritani, Pavan, & Ometto, 2018 ; Roggero, Bisaro, & Villamayor-Tomas, 2018).

Le cadre théorique de la dynamique des systèmes territoriaux se développe à partir de l'hypothèse selon laquelle les trajectoires préconçues (*path dependencies*) ont une construction historique et sont déterminées par des modèles comportementaux (*behavioral patterns*), incorporés dans un cadre institutionnel de changement adaptatif. Les trajectoires et les comportements sont issues des théories qui communiquent rarement ensemble, mais ils font ici passerelle entre 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 betteravière de la Marne soumise en même temps aux changements des règles institutionnelles de la France. Le modèle systémique est construit autour de la coopérative sucrière Cristal Union qui joue le rôle d'un acteur d'ancrage (anchor tenant) (Chertow, 2007; Onita, et al., 2006 ; Befort et Nieddu, 2017) et trois acteurs

secondaires qui contribuent à la réussite de la symbiose industrielle : Cristanol, la distillerie qui appartient au consortium Cristal Union, l'amidonnerie et glucoserie ADM (ex. CHAMTOR), ainsi qu'Air Liquide, le spécialiste de gazes industriels qui transforme le dioxyde de carbone en intrant pour l'industrie de boissons gazeuses.

2. Cadre théorique de la symbiose industrielle dans la bioraffinerie

Le cadre théorique auquel on fait appel pour expliquer la mise en œuvre de l'écologie industrielle dans le contexte de la bioéconomie comprend l'analyse économique des institutions (Baas & Boons, 2004; Decouzon, Maillefert, Petit, & Sarran, 2015; Ostrom & Basurto, 2011) et la théorie des systèmes complexes. Ces deux théories cherchent à mettre en lumière la dimension structurelle du marché, issue du passage conceptuel du déchet aux coproduits. La dynamique des systèmes territoriaux comme méthode d'analyse permet d'identifier les boucles de rétroaction qui régulent ou amplifient le système (logique stocks – flux).

2.1. Les déchets, une production comme les autres ?

Les acteurs de la PBP insistent sur l'usage de la notion de « coproduits » plutôt que celle de déchets. Ce glissement sémantique déclenche un processus de mise en production de coproduits et son intégration comme un élément du système productif. En effet, par définition, le déchet doit être éliminé, notamment par la mise en place de procédés plus efficaces, la lutte 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. 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'échange, et pour entrer finalement dans un réseau de consommation (Callon, 2016).

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 1930 (Galambos, Hikino, & Zamagni, 2007) (Benninga, 1990), c'est-à-dire que 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, il peut se déployer à l'échelle d'un site industriel dans la figure d'une SI. Dans ce cas, la PBP, tout comme la bioraffinerie de la région nord Fluminense au Brésil (Santos & Magrini, 2018), ou celui de Wanze en Belgique, se placent comme des exemples représentatifs.

Les bioraffineries sont alimentées en matières premières par des coproduits agricoles (ou déchets), et autres coproduits comme la vapeur, résidus, etc., qui sont utilisés par des entreprises environnantes installées à proximité en raison de la disponibilité de ces ressources. A ce titre, le cas de Bazancourt-Pomacle est un cas exemplaire de développement d'une SI 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, Thenot, & Lescieux-Katir, 2018; Domenech, Bleischwitz, Doranova, Panayotopoulos, & Roman, 2019; Thénot, Bouteiller, & Lescieux-Katir, 2018.; Thénot & Honorine FFE, 2017).

2.2.La bioraffinerie: une institution de coordination

La bioraffinerie à la fois est une unité de production et une institution de coordination pour les acteurs (Vivien et al., 2019) dans l'organisation de l'action collective au sein de la SI (Ostrom & Basurto, 2011; Callon, 2016 ; Roggero et al., 2018). En effet, afin de se coordonner, les acteurs de la SI vont devoir mettre en place des procédures décisionnelles collectives, de choix d'allocations 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 SI ; 2) les acteurs sont soumis au contexte réglementaire et institutionnel dans lequel ils évoluent et ; 3) les acteurs sont soumis à l'incertitude de chocs extérieurs. D'après la première contrainte, ce sont les acteurs les plus puissants qui auront la capacité d'imposer des règles d'allocation de ressources en fonction des types de production visées. La SI va s'organiser autour de ces agents dont l'intérêt est de maîtriser l'organisation des flux et de ressources. Puis, d'après la deuxième contrainte, les acteurs seront obligés de jongler avec une classification normative complexe qui privilégie l'arbitrage entre un niveau de responsabilité qui augmente et l'incertitude de leur activité. Par exemple, les bioraffineries en France ont subi la réduction des taux d'incorporation de biocarburants comme une remise en cause de leur modèle. Enfin, les acteurs sont soumis à l'incertitude de 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 suite à l'effet des politiques de réduction des déchets.

La PBP présente l'exemple indiscutable d'une démarche en bioéconomie qui en même temps s'érige comme une expérience aboutie de SI. Elle rassemble 10 acteurs parmi lesquels Vivescia/Blétanol, Cristal Union, Cristanol, Chamtor, Givaudan Active Beauty, Wheatoleo, Air Liquide, Européenne de biomasse, un centre de recherche industrielle (ARD) et un centre de recherche académique (le CEBB). Sur l'axe betteravier de la plateforme on a 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 cailloux, des écumes de siroperie, le sirop de basse pureté issus

de la cristallisation, les vinasses, et le CO₂ résultant de la distillation et de la cristallisation.

Ces coproduits sont ici tous réutilisés : l'eau d'évaporation pour laver et rapper les betteraves, le sirop de basse pureté pour être distillé en alcool ou bioéthanol, le CO₂ pour gazéifier des boissons, les pulpes surpressées pour l'alimentation animale, les sables et cailloux pour la stabilisation des routes en milieu rural, et finalement, les écumes de siroperie ainsi que la vinasse de distillerie sont réutilisées pour amender les sols.

2.3. Les effets de rétroaction, un analyse systémique causale

Trois différentes théories composent l'analyse systémique à travers lesquelles on explique les relations causales, les connexions, les effets d'entraînement et les compromis poursuivis par le réseau de relations 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 est essentielle pour la compréhension de la SI. Dorénavant, la proximité devient une variable pertinente pour orienter l'analyse de l'écosystème agroindustriel de la SI. L'approche par la proximité englobe deux dimensions complémentaires : 1) la proximité géographique et relationnelle définie par la distance cartésienne et ; 2) la proximité organisationnelle/institutionnelle qui fait référence au réseau de relations au-delà de l'espace physique (Beurain & Brulot, 2011).

La théorie des systèmes adaptatifs complexes cherche à articuler des disciplines qui étaient auparavant déconnectées, non par envie de rassembler toutes les connaissances mais parce que la complexité implique la reconnaissance de l'incertitude (Miller & Miller, 2007). La pensée complexe (Patrucco, 2011) met en évidence deux caractéristiques: 1) le tout ne peut pas être réduit à la somme de 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 une perturbation organisationnelle pourrait provoquer la dégradation du système. L'idée d'un système ouvert, hors équilibre qui évolue vers un dynamisme stabilisant pourrait créer le consensus nécessaire pour intégrer la complexité à travers la théorie des écosystèmes à nos réflexions.

Enfin, la théorie des écosystèmes fait l'objet d'un certain engouement dans la communauté académique (E. M. Morales, Diemer, Cervantes, & Carrillo-González, 2019; Tsujimoto et al., 2017; Nielsen, 2007), notamment via les cinq postulats suivants : 1) l'analyse organique des réseaux, qui présente aussi leurs propriétés négatives: compétition trophique, déprédation, parasitisme et destruction de l'écosystème ; 2) la reconnaissance de la diversité d'acteurs avec attributs, motivations et objectifs propres, qui déterminent la rationalité de ses décisions ; 3) les limites de l'écosystème sont établis sur les chaînes d'approvisionnement des produits/services ; 4) l'évolution dynamique des écosystèmes est nécessaire dans le temps et 5) la structure comportementale et décisionnelle a une influence sur la durabilité ou la disparition de l'écosystème en lui-même.

3. Méthodologie

La dynamique des systèmes est une méthodologie développée pour l'étude de problèmes non linéaires complexes émanant du comportement des systèmes. Les travaux de J.J Forrester - *Industrial Dynamics* (1961) et *Urban Dynamics* (1969) – ou encore l'ouvrage très médiatisé *Limits to growth* (Meadows, Meadow, Randers, & Behrens, 1972) ont largement diffusé la dynamique des systèmes (System Dynamics) dans la communauté scientifique. La dynamique de systèmes cherche à délimiter le système, analyser les modes de comportement constituant la structure du système, identifier les acteurs et les boucles de rétroaction (de régulation ou d'amplification) dans une logique stocks – flux d'équilibre dynamique. L'équilibre est dynamique car il est en mouvement constant en fonction des relations causales qui amplifient

ou régulent les flux et les délais, il ne résulte pas d'un processus d'optimisation comme dans les modèles d'allocation économique statique et linéaire où l'équilibre est fixe.

Pour notre étude de cas, nous avons utilisé des données provenant de sources publiques secondaires qui comprennent : 1) les rapports institutionnels et les plans d'action, 2) les communications officielles des acteurs, de la municipalité et la région, 3) toute la littérature académique en anglais et en français sur la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle. Nous avons ensuite validé les données en interrogeant des consultants ayant une certaine expertise de la Bioraffinerie, comme les directeurs d'Européenne de Biomasse et ARD. Entre les rapports institutionnels et les plans d'action analysés, on peut compter le Rapport d'activités 2017/2018 (Cristal Union, 2018) ainsi comme la feuille de route nationale de 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, 2014) ; les références en matière d'écologie industrielle et territoriale ; le guide pour agir dans les territoires (Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2014) ; le rapport une stratégie Bioéconomique pour la France. Plan d'action 2018-2020 (Ministère de l'Agriculture et l'Alimentation, 2018) et le Memento Economie de proximité, économie circulaire et écologie industrielle et territoriale (France Custer, 2018).

L'approche de la dynamique des systèmes territoriaux englobe la théorie institutionnelle et la théorie des systèmes, axes qui ont été développés précédemment dans le cadre théorique. Il est important de bien définir le socle théorique de cette méthodologie qui, d'après nos recherches, n'a jamais été utilisée pour analyser les SI, sauf exception de l'étude publié par Morales et al. (2019) et celui de Cui, Liu, Côté, & Liu (2018). La dynamique des systèmes territoriaux cherche à représenter des modèles territoriaux de la chaîne d'approvisionnement betteravier dans le cas de l'écosystème agroindustriel de la PBP.

4. Discussion

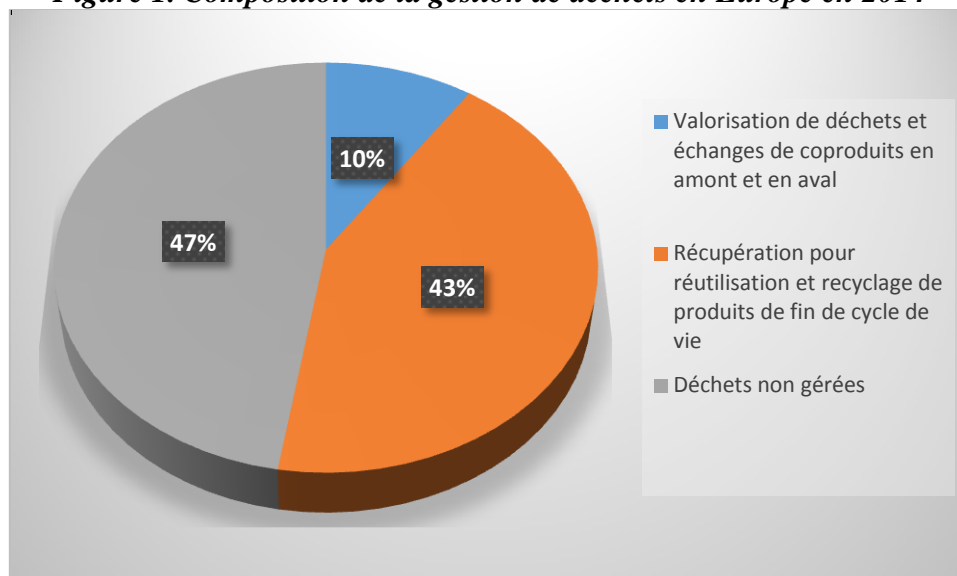
Nous avons identifié la bioraffinerie (Santos & Magrini, 2018) comme un écosystème porteur d'un potentiel en matière de développement durable (cet écosystème se situe au carrefour des zones urbaines et rurales). Dans cette étude, nous partons du fait qu'en associant le concept de bioraffinerie et celui de SI, l'écosystème agroindustriel 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 celui d'identifier les enjeux susceptibles de provoquer des changements structurels à grande échelle, de petits ajustements qui déclenchent une sorte d'effet multiplicateur.

4.1. Politique européenne et arbitrage en quête d'une écologie industrielle

Sur la base d'une analyse approfondie, nous constatons que les directives pour la gestion des déchets en Europe et en France reposent sur une logique de hiérarchisation dominante, inscrite sur la feuille de route de la gestion des déchets (Gregson, Crang, Fuller, & Holmes, 2015). Cette hiérarchisation ne prend pas en compte le critère territorial et ne renvoie à aucune réalité sociale et environnementale. Les trois catégories énoncées dans la hiérarchie sont (par ordre décroissant) : 1) La prévention de déchets, 2) La récupération pour réutilisation et recyclage des produits de fin de cycle de vie et, 3) La valorisation des déchets et des échanges de coproduits en amont et en aval.

La prévention des déchets est en fonction de la prolongation de la durée de vie des produits et de la réduction du comportement consommatrice entre autres. Une enquête menée en 2008 auprès de 36 des plus grands fabricants d'électronique de Chine a révélé qu'il était difficile de mettre en lumière la conception écologique de leurs produits (Gregson et al., 2015) donc par manque de données dans ce premier groupe on a décidé de s'adresser qu'aux deux dernières catégories dans l'analyse quantitative illustrée dans la Figure 1.

Figure 1. Composition de la gestion de déchets en Europe en 2014



Source : Elaboré avec des informations obtenus auprès de 1) Eurostat, 2019; 2)(Hoornweg, Bhada-Tata, & Kennedy, 2015) et 3) (Mayer et al., 2018)

La Figure 1 illustre comment la récupération pour réutilisation et recyclage des produits en fin de cycle de vie (après consommation), a touché près de 43% des déchets solides urbains en Europe en 2014 (Hoornweg et al., 2015). La valorisation des déchets et des échanges de coproduits en amont ou en aval, y compris le secteur de la bioéconomie, est mesurée par le taux cyclique socio-économique (ISCr) = part des matières secondaires / matières traitées est de 9,6% en Europe (UE28) en 2014 (Mayer et al., 2018). Pour intégrer le changement adaptatif institutionnel à notre méthodologie, nous avons insisté sur la définition du rôle des acteurs de la SI dans une région de forte tradition agricole et agroindustrielle comme celui de Pomacle-Bazancourt. 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 ; et le scénario de diminution de production de betterave sucrière issue des intempéries, risques climatiques ou décisions politico-économiques.

4.2. Leviers de la valorisation de coproduits issues de la betterave sucrière

Nous avons identifié la bioéconomie comme un écosystème porteur d'un potentiel en matière de développement durable (cet écosystème se situe au carrefour des zones urbaines et rurales) (Santos & Magrini, 2018). Dans cette étude, nous partons du fait qu'en associant le concept de bioéconomie circulaire et celui de SI, les territoires historiquement agro-industriels peuvent s'analyser en intégrant l'approche de proximité géographique à travers la grille méthodologique de la dynamique des systèmes, ce qui permet de visualiser les effets des décisions d'allocation sur les différents scénarios, grâce à des simulations du système agroindustriel qui utilisent les stocks et les flux.

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, France en 2017 (Ministère de l'Agriculture et l'Alimentation, 2019), qui compte 3 millions de tonnes en 2014 (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 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 transformées 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%. A 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 équations soumises aux hypothèses du modèle (voir Tableau 1 ci-dessous) reliant les fondements théoriques du modèle avec les conditions initiales.

Tableau 1. Les hypothèses du modèle

Les hypothèses sur la production de betterave

- 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%,

Les hypothèses sur les utilisations des betteraves

- 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,
- Le taux d'efficacité technique de cristallisation est 13% ce qui représente le volume de betterave susceptible d'être transformé en jus vert,
- 19% de ces jus verts seraient de basse qualité, donc inadaptés à l'alimentation humaine,
- Le taux d'efficacité technique de distillation est de 6% et représente le volume de betterave transformé en volume d'alcool,

Les hypothèses sur la production de coproduits

- La production de sirop de basse pureté est calculée à 54.600 tonnes et le stock de coproduits de la distillation fixée à 101.929 tonnes (y compris les betteraves disponibles directement destinées à la distillation),
- Le taux d'émission de CO₂ à partir du sucre est de 45% du volume total de sucre,
- Le taux d'émission de CO₂ à partir du sirop de basse pureté destiné à la distillation est de 25% de son volume total,
- Le taux de production de vinasse à partir du sucre est de 6,5%,
- Le taux de production de vinasse à partir du sirop de basse pureté est de 5%,

Les hypothèses de boucle de rétroaction (dite de régulation ou d'amplification)

- Le sirop de basse pureté résultant de la cristallisation est un coproduit réintégré comme input de la distillation,
- Le CO₂ récolté comme coproduit de la cristallisation et distillation est réutilisé par Air Liquide.

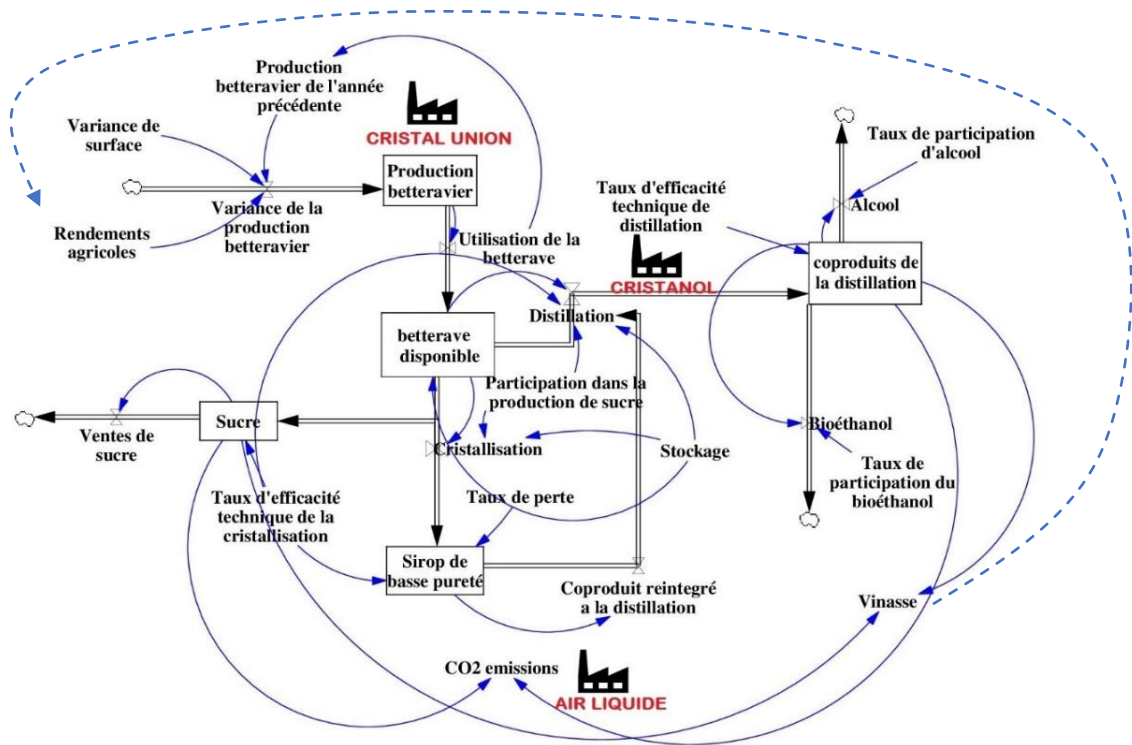
Les hypothèses sur les délais entre les décisions et leurs effets

- La superficie de plantation est décidée bien avant la récolte, basée sur l'information de l'année précédente ;
- Il n'y a pas stock de sucre dans le modèle, les ventes du sucre sont égales au sucre produit.

Dans la Figure 2 ci-dessous 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 la production de l'année courante. Par exemple, la production de sucre de l'année courante va dépendre du taux d'efficacité technique de cristallisation des sirops. Les technologies disponibles et leur

efficacité sont symbolisées par des taux de niveau représentés par les flèches noires doubles qui se relie avec le symbole suivante (X) et qui peuvent évoluer dans le temps.

Figure 2. Diagramme de flux et de stocks de la PBP à partir de la betterave



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 niveau désigne l'évolution des flux dans le temps, tels que les coproduits réintégré 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 dû au manque de données accessibles. i.e. 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 concerne la biomasse, les produits et coproduits.

Le modèle va dépendre des conditions des années antérieures (stocks), des conditions de l'année en cours (flux), et des décisions d'allocation des acteurs (taux de niveaux) de la SI.

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. Toutes les flèches continues ont été modélisées et intégrées dans les équations pour les simulations (voir Annexe 1).

5. Résultats

En intégrant des variables telles que l'évolution du portfolio de valorisation de la betterave sucrière comme 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 SI. Cette étude peut encourager les réglementations actuelles en matière d'écologie industrielle 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.

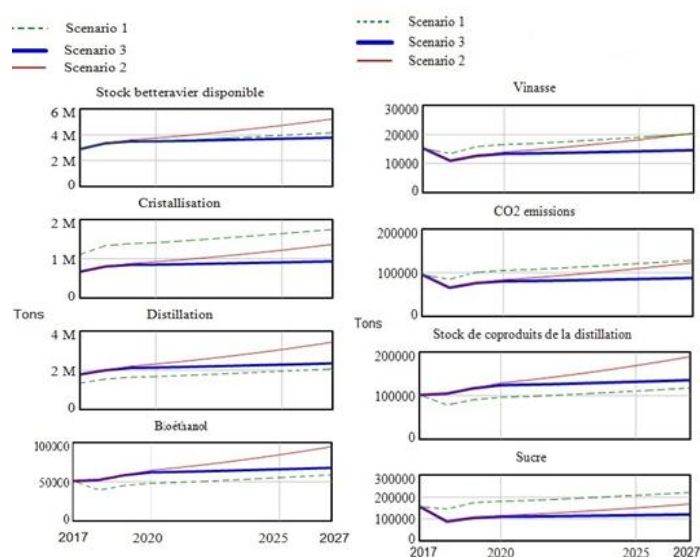
C'est grâce à l'information fournie par les simulations que l'on peut mieux gérer la complexité d'un écosystème agroindustriel comme celui de la PBP, à partir d'un arbitrage rationnel pour valoriser les coproduits issus de la biomasse. Par contre, le même écosystème agroindustriel est soumis aussi à une série de contraintes techniques et variables exogènes de caractère politique ou économique sur lesquelles il n'a aucune possibilité d'interférence, comme le prix du marché international et les politiques agricoles européennes. Le fait de pouvoir différencier entre les variables exogènes et endogènes du modèle est un avantage pour la gestion interne du système local, car il est possible de simuler différents scénarios causals déterminés par des variables exogènes sur lesquelles on n'a carrément aucune influence au sein de l'écosystème local. Néanmoins, il est possible tester les effets et impacts des décisions socioéconomiques sur lesquelles les acteurs de l'écosystème peuvent agir de façon proactive. Par exemple, issu de l'évolution du portfolio de valorisation de la betterave sucrière envers des procédés d'une plus haute valeur ajoutée, le modèle nous montre une

tendance à réduire le stock et la production de betterave sucrière disponible comme l'effet causal de cette valorisation.

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

- **Scénario 1 (de référence)** : Les conditions de départ de 2017 se maintiennent avec les mêmes comportements jusqu'au 2027,
- **Scénario 2** : La répartition de la valorisation en sucre-alcool passe de 50%-50% à une répartition 30%-70%, avec une augmentation de la superficie cultivée annuelle de 6% annuel, 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 ajoutant une hypothèse de baisse de la production betteravière de 5% annuelle, soit une baisse plus faible que les fluctuations de plus de 15% constatées en France entre 2010, 2011 et 2012. Cela permet de simuler l'impact du changement climatique composé de pluies ou sécheresses extrêmes. Les résultats des différents scénarios sont présentés dans la Figure 3.

Figure 3. Simulations systémiques de la PBP à partir de scénarios



- La ligne en pointillé (verte) montre la trajectoire dans le scénario de référence, qu'illustre la stabilité du système, qui rime avec une augmentation modérée du sucre et de bioéthanol.
- La ligne fine et continue (rouge) montre l'augmentation du stock betteravier et la baisse relative de production de sucre. Le décalage du point d'origine de la distillation et cristallisation par rapport au scénario de référence est dû au fait que la transition du mix de répartition entre production de sucre et alcool est effective dès l'instant où la décision d'allocation est prise. On a aussi une baisse à court terme de la production de vinasse et de CO₂, dont les niveaux se redressent à long terme. Cette évolution risque d'entraîner une crise temporaire dans la réutilisation du CO₂ par Air Liquide et dans la réutilisation de la vinasse pour amender les sols.
- La ligne en gras et continue (en bleu), montre un niveau de stock betteravier similaire à celui du scénario de référence, mais aussi une stagnation de la production de sucre et de bioéthanol, ce qui 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 entraînent une réduction de la production de sucre avec comme résultat une réduction de coproduits potentiellement réutilisables et valorisables via les synergies de la PBP, ce qui peut mettre en péril les synergies issues de la valorisation des coproduits de la betterave.

6. Conclusion

La façon dont les principes d'écologie industrielle fonctionnent dans un contexte bioéconomique sont complexes. Pour les internaliser et les opérationnaliser on a fait appel à la dynamique de systèmes territoriaux. Elle-seule est capable de gérer la complexité et d'intégrer

les effets des comportements des acteurs. L'approche territoriale de la SI favorise l'identification des intérêts et des valeurs qui gouvernent la structure de l'écosystème agroalimentaire, ainsi comme l'arbitrage rationnel collectif à travers ses différents acteurs. Il nous permet aussi de découvrir l'influence biophysique et sociale des acteurs et 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 micro, comme par exemple la fin des quotas européens en 2017 et l'évolution du portfolio de valorisation de coproduits et produits de la betterave sucrière, lors de l'analyse des scénarios.

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

Cette étude n'est pas exempte de critiques liées à la méthode de recherche en termes de robustesse et de validité. Les idées collectées pendant la revue de littérature des symbioses industrielles ne sont pas toujours directement transférables à la bioraffinerie, et la phase de validation n'est pas encore mise en marche, donc la comparaison des résultats avec d'autres études et la généralisation des conclusions sont discutables. Cependant, l'originalité de cette méthode peut contribuer à la compréhension du rôle du territoire dans la stratégie de symbiose industrielle de la Bioéconomie circulaire, laquelle peut être appréhendée par des indicateurs

structurels et territorialisés du développement durable. L'originalité de la dynamique des systèmes territoriaux repose sur la richesse des références et des informations qualitatives recueillies, structurées de manière systémique et reproductible.

Remerciements: Les auteurs souhaitent remercier le Pôle de Compétitivité IAR, le ARD et l'Entreprise Européenne de Biomasse tous parties prenantes de l'écosystème agroindustrielle de la Bioraffinerie Bazancourt-Pomacle, pour les informations précieuses et très utiles qu'ils ont fournies à l'égard de leur expérience pratique acquise sur le terrain.

Conflit d'intérêts: Nous souhaitons confirmer qu'il n'y a pas de conflits d'intérêts connus associés à cette publication. Le manuscrit a été lu et approuvé par tous les auteurs et tous ont approuvé l'ordre des auteurs dans le manuscrit.

7. Références

1. ADEME. (2014). *Guide méthodologique du développement des stratégies régionales d'économie circulaire en France*.
2. 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>
3. Beaurain, C., & Brullot, S. (2011). L'écologie industrielle comme processus de développement territorial: une lecture par proximité. *Revue d'Economie Régionale & Urbaine*, 2, 313–340.
4. Benninga, H. (1990). *A history of acid lactic making. A Chapter in the history of Biotechnology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
5. Bouteiller, 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>
6. Callon, M. (2016). Revisiting marketization: from interface-markets to market-agencements. *Consumption Markets and Culture*, 19(1), 17–37. <https://doi.org/10.1080/10253866.2015.1067002>
7. Chertow, M. R. (2007). Uncovering Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 11–30. Retrieved from www.mitpressjournals.org/jie
8. Conseil Général de l'Agriculture de l'Alimentation et des Espaces Ruraux. (2015). *Quelle ambition pour la filière betterave-sucre française dans la perspective de la fin des quotas européens ?* Paris: Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt.
9. Cristal Union. (2018). *Rapport d'activités 2017/2018 Cristal Union*.
10. Cui, H., Liu, C., Côté, R., & Liu, W. (2018). Understanding the evolution of industrial

- symbiosis with a system dynamics model: A case study of Hai Hua Industrial Symbiosis, China. *Sustainability (Switzerland)*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10113873>
11. Decouzon, C., Maillefert, M., Petit, O., & Sarran, A. (2015). Des clusters aux écosystèmes industriels locaux Arrangements institutionnels et écologie industrielle. *Revue d'économie Industrielle*, 152.
 12. Diemer, A. (2016). Les symbioses industrielles: un nouveau champ d'analyse pour l'économie industrielle, 2, 65–94. <https://doi.org/10.3917/inno.050.0065>
 13. 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? *Revue Francophone Du Développement Durable*, 4, 52–71.
 14. 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>
 15. FAO. (2019, 06 01). FAOSTAT. Rome, Italy.
 16. 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 (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su9122383>
 17. Forrester, J. (1961). *Industrial dynamics*. Cambridge, Mass.: M.I.T. Press.
 18. Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Massachusetts: MIT Press Cambridge.
 19. Forrester, J. (1969). *Urban Dynamics*. Portland, OR.: Productivity Press.
 20. Forrester, J. (1970). *Urban Dynamics*. Massachusetts: MIT Press: Cambridge.
 21. France Custer. (2018). *Mémento: Économie de proximité, économie circulaire et écologie industrielle et territoriale*.
 22. Galambos, L., Hikino, T., & Zamagni, V. (2007). The Global Chemical Industry in the Age of the Petrochemical Revolution. *Cambridge University Press*.
 23. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
 24. 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*. <https://doi.org/10.1080/03085147.2015.1013353>
 25. Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., & Kennedy, C. (2015). Peak Waste: When Is It Likely to Occur? *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12165>
 26. Mayer, A., Haas, W., Wiedenhofer, D., Krausmann, F., Nuss, P., & Blengini, G. A. (2018). Measuring Progress towards a Circular Economy: A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12809>
 27. Meadows, D., Meadow, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *Limits to Growth*. New York: Potomac Associates-Universe.
 28. Miller, J., & Miller, J. (2007). *Complex Adaptive Systems*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

29. Ministère de l'Agriculture et l'Alimentation. (2018). *Une stratégies Bio-économie pour la France. Plan d'action 2018-2020.*
30. Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie. (2014). *Références écologies industrielle et territorial: la guide pour agir dans les territoires.*
31. Ministère de la transition écologique et solidaire. (2018). *Feuille de route national de l'économie circulaire.* Paris.
32. Ministère de l'Agriculture et l'Alimentation. (2019, 18 06). AGRESTE. Paris, France.
33. Ministère de l'Agriculture et l'Alimentation. (2019). AGRESTE. Paris: Agreste.
34. 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.* <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.026>
35. Morales, M. E., & Diemer, A. (2019). Industrial Symbiosis Dynamics, a Strategy to Accomplish Complex Analysis: The Dunkirk Case Study. *Sustainability (Switzerland), 11(1971)*, 1–18. <https://doi.org/10.3390/su11071971>
36. 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>
37. Onita, J. A., Author, F., Ahoada, J., & Sammanfattning, O. (2006). *How does industrial symbiosis influence environmental performance?* Linkopings Universitet.
38. Ostrom, E., & Basurto, X. (2011). Crafting analytical tools to study institutional change. *Journal of Institutional Economics.* <https://doi.org/10.1017/S1744137410000305>
39. 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.* <https://doi.org/10.1080/10438599.2011.562356>
40. 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.* <https://doi.org/10.1017/S1744137417000376>
41. Roseland, M. (1997). Dimensions of the eco-city. *Cities.* [https://doi.org/10.1016/s0264-2751\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/s0264-2751(97)00003-6)
42. 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>
43. 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>
44. Sylvain Germont. (2019). *Dossier de candidature appel a projets programme d'investissements d'avenir. Action "Territoires d'Innovation".*
45. 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>
46. Thénot, M., Bouteiller, C., & Lescieux-Katir, H. (2016). Des coopératives agricoles agents

de symbiose industrielle. Retrieved from <https://www.cairn.info/revue-recma-2018-1-page-31.htm>

47. Thénot, 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>
48. Tsujimoto, M., Kajikawa, Y., Tomita, J., & Matsumoto, Y. (2017). A review of the ecosystem concept-Towards coherent ecosystem design Keywords: Ecosystem Business ecosystem Platform management Multi-level perspective Coherent ecosystem. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.032>

Les équations de production du modèle reliant les acteurs

Notre modèle dynamique simplifié repose sur dix équations qui relient les actions et leurs effets

1)

Variance de la production betteravière_t = Variance de surface_t × Rendements agricoles_t × Production betteravière_{t-1}

2)

Production betteravère_t =
Production betteravière_{t-1} + (Variance moyenne de la production betteravier –
Utilisation de la betterave_{t-1})

3) Betterave disponible_t = Betterave disponible_{t-1} – (Cristallisation + Distillation) +
(Production de la betterave_t + Stockage_t)

4)

Distillation_t =
((Betterave disponible_t – Stockage_t) × (1 – Participation dans la production de sucre_t)) +
($\frac{\text{Coproducts reintegré à la distillation}_t}{\text{Taux d'efficacité technique de la cristallisation}}$)

5)

Syrop de basse pureté_t =
Syrop de basse pureté_{t-1} – Coproduit reintegre a la distillation_{t-1} + (Cristallisation_t ×
Taux de perte × Taux d'efficacite technique de la cristallisation)

6) Sucre_t = Sucre_{t-1} + (Cristallisation_t × Taux d'efficacite technique de la cristallisation) –
Ventes de sucre_t

7) Coproduits de la distillation_t = Coproduits de la distillation_{t-1} + (Distillation_t ×
Taux d'efficacite technique de distillation) – (Alcool_t + Bioethanol_t)

8)

Cristallisation_t =
(Betterave disponible_t – Stockage_t) × Participation dans la production de sucre

Annexe 1