



**HAL**  
open science

# Agilité de la chaîne de transformation de la matière dans un contexte d’approvisionnement et de demande instables : application à la biomasse

Michelle Houngré

## ► To cite this version:

Michelle Houngré. Agilité de la chaîne de transformation de la matière dans un contexte d’approvisionnement et de demande instables : application à la biomasse. Autre [cs.OH]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2021. Français. NNT : 2021INPT0023 . tel-04169690

**HAL Id: tel-04169690**

**<https://theses.hal.science/tel-04169690>**

Submitted on 24 Jul 2023

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

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



Université  
de Toulouse

# THÈSE

En vue de l'obtention du

## DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

**Délivré par :**

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

**Discipline ou spécialité :**

Informatique et Génie Industriel

---

**Présentée et soutenue par :**

Mme MICHELLE HOUNGBE

le vendredi 5 mars 2021

**Titre :**

Agilité de la chaîne de transformation de la matière dans un contexte d'approvisionnement et de demande instables : application à la biomasse

---

**Ecole doctorale :**

Systèmes (EDSYS)

**Unité de recherche :**

Laboratoire de Génie Chimique ( LGC)

**Directeur(s) de Thèse :**

M. STEPHANE NEGNY

MME ANNE-MARIE BARTHE-DELANOË

**Rapporteurs :**

MME GWENOLA YANNOU-LE BRIS, AGROPARISTECH MASSY

MME LAURE MOREL, UNIVERSITE LORRAINE

**Membre(s) du jury :**

M. FRÉDÉRIK BENABEN, ECOLE NLE SUP DES MINES ALBI CARMAUX, Président

MME ANNE-MARIE BARTHE-DELANOË, ECOLE NLE SUP DES MINES ALBI CARMAUX, Membre

MME SYLVAIN BERGER, SOLAGRO, Invité(e)

M. MORGAN VACHON, Communauté de Communes Cœur Haute Lande, Membre

M. STEPHANE NEGNY, TOULOUSE INP, Membre

*À ma famille,*



# Remerciements

---

Le moment est venu d'écrire les derniers mots de cette thèse. Après trois belles et riches années, je tiens à remercier les personnes qui m'ont permis de mener ces travaux de recherche à leur terme.

Avant toute chose, je tiens à remercier ceux qui m'ont fait confiance, accompagné et guidé au quotidien sur tous les fronts : mon directeur de thèse Stéphane Négny et ma co-directrice de thèse Anne-Marie Barthe Delanoë. Je vous remercie de m'avoir donné la chance de clôturer ma reprise d'étude par un doctorat. Un très grand merci Stéphane pour ton empathie, ta simplicité et ta capacité à toujours trouver les mots justes quelle que soit la situation. Un très grand merci Anne-Marie pour ta patience, ton écoute et ta capacité à motiver. Votre encadrement bienveillant et complémentaire que ce soit sur la démarche scientifique ou sur les aspects administratifs et logistiques de la thèse ont été déterminants pour que les travaux se déroulent dans les meilleures conditions. Vous m'avez ouvert à de nouvelles disciplines tout en me transmettant les clés pour bâtir un raisonnement scientifique organisé. Je me souviens d'une discussion d'après réunion, comme il y en a eu beaucoup, concernant l'attractivité de la recherche publique. Aujourd'hui, je peux l'affirmer sans détours, ce sont des hauts niveaux d'expertise, d'éthique professionnelle, de rigueur scientifique, d'humilité, d'ouverture d'esprit comme les vôtres qui rendent la recherche publique motivante et passionnante.

J'adresse tous mes remerciements à l'ensemble des membres de mon jury de thèse. Ce fut un honneur de vous avoir en tant que président du jury Frédérick Bénaben. Merci beaucoup de l'avoir présidé d'une si belle manière : simple, agréable et détendue. Mes remerciements s'adressent également à Laure Morel et Gwenola Yannou-Le-Bris pour leurs rapports complets et étayés ainsi que nos échanges constructifs. Un grand merci à Sylvaine Berger pour son temps, son accompagnement et sa vision qui ont rendu ces travaux réalistes. Merci à Morgan Vachon ainsi qu'à la Mairie d'Escource pour leur accueil chaleureux et l'intérêt porté à ces travaux.

Le prototype logiciel n'aurait pas pu voir le jour sans toi Iréa Touche. Je te remercie pour ton implication, ta patience, ta pédagogie et ta grande gentillesse. Merci d'avoir toujours répondu favorablement à mes nombreuses sollicitations, avec sourire et humour.

À présent, je souhaite adresser mes sincères remerciements à Roman Teisserenc et Vincent Gerbaud. Sans votre soutien, je n'aurais pas pu prétendre faire cette thèse. Vous portez des valeurs, une formation résolument innovante (composée d'une équipe pédagogique particulièrement inspirante) et une vision des changements touchant notre société actuelle qui ont indéniablement redonné du sens et un cap à ma trajectoire professionnelle. Vous m'avez toujours porté une oreille attentive et bienveillante qui m'a permis de rebondir quand la situation était nécessaire.

Je remercie la gentillesse et la proximité des membres du Laboratoire de Génie Chimique. Un grand merci tout particulier aux professeurs, aux enseignants-chercheurs et aux chercheurs du département Procédés et Systèmes Industriels « PSI ». J'ai vraiment apprécié vous côtoyer durant la thèse. Votre accueil chaleureux au sein de l'équipe ainsi que votre altruisme ont participé à me fournir l'énergie et l'envie de me rendre au laboratoire avec sourire tous les matins. Je remercie également Patricia Uliana, Danièle « Dany » Bouscary et Angélique Pasoti pour votre empathie, votre réactivité et votre écoute concernant les aspects administratifs de la thèse. Merci beaucoup à toi Alain Philip de toujours veiller à ce que chaque doctorant se sente chez lui au laboratoire. Ta générosité et ta sympathie ont été très appréciées.

Ces trois années au Laboratoire de Génie Chimique n'auraient pas été les mêmes sans mes compagnons de route venus des quatre coins du monde et avec qui une belle amitié s'est tissée. J'ai eu la chance de partager avec vous des moments d'exception. Je vous remercie de m'avoir accordé votre amitié avec une grande générosité. Elle a compté durant la thèse et elle continuera de compter encore longtemps. Mille mercis Adriana, Anastasia, Bélen, Claire, Elise, Kalyani, Lauren, Leticia, Lise, Lucille, Margot, Nancy Pauline, Yosra, Alessandro, Jesus, Juliano, « Chucho », Magno, Manuel, Marco, Milad, Pierre « Coach », Samba, Sergio, Thibaud « Président », Thomas, Victor, Waldemir, Youssef, l'équipe des coureurs J'aime ma Thèse et l'équipe Alambic 2019. Avec vous, j'ai apprécié rire (beaucoup rire) manger, prendre le thé, vous faire des gâteaux, refaire le monde, parler science, parler de la vie, débattre et écouter.

Un très grand merci tout particulier à Carlos, Eduardo et Florent avec qui j'ai partagé le bureau et Yohann qui a souvent partagé notre bureau. Je ne pouvais espérer être mieux entourée. Votre enthousiasme, votre sens de l'humour, votre sincérité et votre sensibilité m'ont beaucoup apporté tant sur le plan scientifique que sur le plan personnel. Je mesure la chance de vous compter parmi mes amis.

Merci beaucoup aux amis du MSEI : Jeanne, Timothée, Marie, Ugo, Maxime « Palanquette », Morgana, Camila, Stéphanie, Chloé, Alexis, Guillaîne, Oualid, Aïcha et Fayrouz, aux amis rencontrés durant mon parcours professionnel : Bénédicte « Béné », Karine, aux amis rencontrés durant mon parcours scolaire : Solène, Stéphanie, Priscilia, Séverine, Selvina, Priscilla et les amis du lycée pour tous vos encouragements. Il y a des amitiés qui ont une résonance spéciale. Rassamy et Mariam, vous avez une place toute particulière dans ce cheminement qu'a été celui de faire une thèse. J'ai toujours pu compter sur votre écoute, votre prise de recul bienveillante et votre optimisme, quelle que soit l'heure du jour ou de la nuit. Le soutien que vous m'accordez depuis plus de vingt ans est rare et précieux. Je vous en suis très reconnaissante.

Enfin, je remercie ma très chère famille pour son soutien affectif indéfectible. Je vous remercie d'avoir cru en moi et de m'avoir encouragé avec toute la générosité, l'humour et la douceur qui vous caractérise au quotidien. Tout au long de cette aventure exceptionnelle, vous n'avez cessé de me transmettre votre goût de l'effort, votre envie d'avancer et votre sérénité. Vous êtes le socle, beau, uni et solide, qui me permet d'être la femme que je suis aujourd'hui.

# Table des matières

---

REMERCIEMENTS.....	3
TABLE DES MATIÈRES .....	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	11
1. Contexte général et motivations .....	12
2. Problématique générale et objectifs .....	14
3. Positionnement des travaux de recherche .....	14
3.1. Au sein du laboratoire de Génie Chimique.....	14
3.2. Dans le cadre du projet ARBRE .....	15
4. Organisation du manuscrit .....	16
<b>PARTIE A : CADRE CONTEXTUEL ET ETAT DE L'ART .....</b>	<b>19</b>
<b>CHAPITRE I. CONTEXTE INDUSTRIEL, ENJEUX ET PROBLÉMATIQUE .....</b>	<b>21</b>
I.1. Contexte de l'industrie de procédés.....	22
I.1.1. Notion de procédé .....	22
I.1.1. Évolutions économiques et sociales .....	23
I.1.2. Évolutions technologiques.....	23
I.2. Industrie de procédés au cœur du renouveau industriel : les enjeux.....	25
I.2.1. Nécessité d'un changement de paradigme de production.....	25
I.2.2. Essor des services dans l'industrie.....	25
I.2.3. Intégration des concepts et des technologies de l'Industrie 4.0 .....	27
I.3. Cadre de recherche des travaux de thèse .....	28
I.3.1. Vers une approche disruptive.....	28
I.3.2. Problématique scientifique .....	28
I.3.3. Axes de développement de l'agilité pour le Génie des Procédés .....	29
I.3.4. Cas d'application : la transformation de la biomasse.....	31
I.4. Conclusion .....	34

<b>CHAPITRE II. ÉTAT DE L'ART DE L'AGILITÉ POUR L'INDUSTRIE DE PROCÉDÉS .....</b>	<b>35</b>
<b>II.1. Concept de l'agilité pour l'industrie de procédés .....</b>	<b>36</b>
II.1.1. Aperçu général de l'agilité .....	36
II.1.2. Définitions de l'agilité dans l'ingénierie de production.....	37
II.1.3. Synthèse et proposition d'une définition pour l'industrie de procédés .....	39
<b>II.2. Analyse des concepts en rapport avec l'agilité .....</b>	<b>40</b>
II.2.1. Différentes appellations relatives au concept d'agilité .....	40
II.2.2. Comparaison avec notre définition de l'agilité.....	42
<b>II.3. Cadre méthodologique existant de l'agilité dans le Génie des Procédés .....</b>	<b>43</b>
II.3.1. Méthodes et outils existants relatifs à la flexibilité .....	43
II.3.2. Méthodes et outils existants relatifs à la modularité .....	45
II.3.3. Enseignements de la revue de littérature dans le Génie des Procédés.....	46
<b>II.4. Méthodes et outils existants de l'agilité dans le Génie Industriel.....</b>	<b>47</b>
II.4.1. Méthodes et outils existants dans le secteur de la production manufacturière .....	48
II.4.2. Méthodes et outils existants à l'échelle de la chaîne logistique .....	49
II.4.3. Enseignements de la revue de littérature dans le Génie Industriel .....	52
<b>II.5. Conclusion .....</b>	<b>55</b>
<b>PARTIE B : PROPOSITION – METHODE DEVELOPEE ET APPLICATION .....</b>	<b>57</b>
<b>CHAPITRE III. CONCEPTUALISATION DE L'AGILITÉ POUR L'INDUSTRIE DE PROCÉDÉS.....</b>	<b>59</b>
<b>III.1. Concepts retenus pour supporter l'agilité .....</b>	<b>60</b>
III.1.1. Collaboration .....	60
III.1.2. Servicisation .....	63
<b>III.2. Proposition de conceptualisation de l'agilité.....</b>	<b>66</b>
III.2.1. Vers une chaîne de transformation intelligente.....	66
III.2.2. Vision système de l'industrie de procédés .....	67
III.2.3. Approche générale de notre proposition de conceptualisation .....	68
<b>III.3. Principes fondamentaux de notre proposition .....</b>	<b>70</b>
III.3.1. Servicisation du procédé.....	70
III.3.2. Chaîne de transformation collaborative .....	71
<b>III.4. Conclusion .....</b>	<b>72</b>

<b>CHAPITRE IV. MODÉLISATION DE LA CONNAISSANCE DE L'ÉCOSYSTÈME DU PROCÉDÉ .....</b>	<b>73</b>
<b>IV.1. Objectifs et enjeux.....</b>	<b>74</b>
IV.1.1. Analyse des besoins .....	74
IV.1.2. Objectifs attendus de la modélisation de la connaissance .....	74
IV.1.3. Données requises.....	76
<b>IV.2. Approches méthodologiques pour modéliser la connaissance de l'écosystème.....</b>	<b>78</b>
IV.2.1. Approches existantes pour modéliser la connaissance dans le Génie des Procédés .....	78
IV.2.2. Choix de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles .....	79
<b>IV.3. Modélisation de la connaissance de l'écosystème .....</b>	<b>81</b>
IV.3.1. Modélisation de la connaissance de la collaboration.....	81
IV.3.2. Modélisation de la situation collaborative appliquée à la biomasse .....	86
IV.3.3. Modélisation de la connaissance sur le procédé.....	93
IV.3.4. Méta-modélisation de la connaissance du procédé appliquée à la biomasse .....	95
<b>IV.4. Conclusion .....</b>	<b>97</b>
<b>CHAPITRE V. TRAITEMENT DE LA CONNAISSANCE.....</b>	<b>99</b>
<b>V.1. Traitement de la connaissance : les objectifs et les enjeux .....</b>	<b>100</b>
V.1.1. Analyse des besoins .....	100
V.1.2. Objectifs du traitement de la connaissance .....	100
V.1.3. Problématiques sous-jacentes.....	101
<b>V.2. Mécanismes existants de déduction des processus .....</b>	<b>107</b>
V.2.1. Types d'approches relatives à la conception de processus .....	107
V.2.2. Mécanismes de déduction de processus dans différents domaines métier .....	107
V.2.3. Déduction de processus collaboratif .....	108
V.2.4. Macro étapes de notre proposition de déduction .....	110
<b>V.3. Logique de déduction .....</b>	<b>112</b>
V.3.1. Hypothèses de travail pour la déduction de la chaîne de transformation de la matière .	112
V.3.2. Structuration des données.....	113
V.3.3. Détail des étapes de notre démarche .....	115
V.3.4. Sélection d'une solution opérationnelle avec l'application de filtres .....	119
<b>V.4. Conclusion .....</b>	<b>124</b>

<b>CHAPITRE VI. CAS D'ÉTUDE .....</b>	<b>125</b>
VI.1. Présentation de l'architecture technique de l'outil logiciel .....	126
VI.2. Présentation des territoires étudiés .....	126
VI.3. Modélisation de la connaissance de l'écosystème du procédé .....	127
VI.3.1. Modélisation de la connaissance de la collaboration.....	127
VI.3.2. Modélisation de la connaissance sur les procédés .....	135
VI.4. Étape de déduction à l'aide du logiciel : application au cas d'étude .....	139
VI.4.1. Traitement préliminaire des données .....	139
VI.4.2. Déduction des procédés pertinents et des chaînes de transformation.....	141
VI.4.3. Sélection des solutions candidates.....	142
VI.5. Introduction de variabilités : analyse de sensibilité.....	145
VI.5.1. Replanification du procédé : instabilité au niveau des services d'acteurs.....	146
VI.5.2. Instabilité de l'approvisionnement : Appel à une alternative du procédé .....	148
VI.5.3. Instabilité de l'offre et de la demande : Appel à nouveau procédé.....	148
VI.5.4. Cas du changement de la distance de référence .....	149
VI.6. Discussion des résultats obtenus.....	150
VI.7. Conclusion .....	152
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>153</b>
1. Contexte, motivations et objectifs généraux.....	154
2. Contributions majeures .....	155
2.1. Conceptualisation de l'agilité pour l'industrie de procédés.....	155
2.2. Détermination d'une approche méthodologique pour développer l'agilité .....	156
2.3. Implémentation de l'agilité.....	157
3. Améliorations et perspectives .....	157
3.1. D'un point de vue socio-économique.....	157
3.2. D'un point de vue métier .....	158
3.3. D'un point de vue de l'implémentation technique de l'outil .....	160
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>161</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>163</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>165</b>

ANNEXES .....	183
Annexe 1 : Technologies et concepts les plus fréquemment cités dans l'Industrie 4.0 (Vaidya et al., 2018) .....	184
Annexe 2 : Concept d'agilité pour la production manufacturière .....	185
Annexe 3 : Concept d'agilité pour les chaînes logistiques .....	186
Annexe 4 : Tableau comparatif des dimensions de notre vision de l'agilité avec les méthodes et les outils des termes proches de l'agilité dans le Génie des Procédés .....	187
Annexe 5 : Modèle entité association pour le procédé agile.....	192
Annexe 6 : Pseudo code commenté de l'algorithme de déduction .....	194
Annexe 7 : Guide d'entretiens .....	198
Annexe 8 : Modèles de partenaires relatifs au cas d'étude.....	201
Annexe 9 : Données relatives aux acteurs .....	206
Annexe 10 : Modèles des procédés étudiés dans le cas d'étude.....	207
Annexe 11 : Référentiel des activités du cas d'étude .....	212
Annexe 12 : Superstructure du procédé de compostage .....	214



# Introduction générale

---

Ce chapitre introductif vise à présenter le cadre dans lequel ces travaux sont menés. Il précise également les enjeux principaux pour lesquels cette thèse souhaite apporter des solutions.

Après avoir détaillé le contexte général et les motivations dans une première partie, les problématiques et les objectifs poursuivis seront explicités dans une deuxième partie. Par la suite, dans une troisième partie, il sera précisé dans quelle dynamique de recherche s'inscrivent ces travaux de thèse avant de détailler l'organisation du manuscrit dans une quatrième partie.

## 1. Contexte général et motivations

La production industrielle est au cœur de la transition énergétique, environnementale et sociétale impulsée par une prise de conscience de la finitude et des impacts des ressources non renouvelables. Tendre vers une industrie durable requiert de réinventer l'ensemble de la chaîne de valeur, de la matière première aux biens et services mis sur le marché, en passant par le procédé. Cet objectif s'appuie non seulement sur des procédés de transformation de la matière plus respectueux de l'environnement mais également sur la conception de solutions innovantes.

Dans cette optique, l'industrie doit faire face à plusieurs défis. En effet, au fil des années, la concurrence industrielle s'est accrue dans un contexte de mondialisation. Pour rester compétitives, les industries sont amenées à investir dans l'amélioration de la performance de leur système de production. Cette concurrence accrue s'accompagne d'une évolution des besoins de la société vers plus de personnalisation et de diversification. Il en découle un appareil productif qui se doit d'être toujours plus flexible et reconfigurable pour répondre à cette demande. Le développement de services à l'industrie devient une composante cruciale que ce soit en matière d'exploitation et de maintenance des unités de production ou de l'extension même du produit final. Par ailleurs, dans cette société de l'information particulièrement attentive aux activités industrielles présentes dans son cadre de vie, l'intégration et l'acceptation de l'industrie à l'échelle territoriale représente un enjeu fort. En effet, la perception de l'industrie de masse, le plus souvent imposante et polluante, doit laisser sa place à une industrie plus performante environnementalement et plus inclusive économiquement.

Pour répondre à ces enjeux, plusieurs voies sont explorées par l'industrie de procédés. La prise en compte du cycle de vie de la matière permet d'appréhender des alternatives d'optimisation de la matière et de traitement des déchets. Par ailleurs, la philosophie de la chimie verte vise à développer de nouvelles voies de synthèse chimiques pour une meilleure utilisation des ressources et une efficacité énergétique améliorée dans des conditions de santé et de sécurité optimales. Elle repose sur l'application de principes diminuant voire éliminant les substances dangereuses au niveau de la conception, de la fabrication et de l'utilisation des produits chimiques. L'innovation occupe une place prépondérante qui œuvre notamment pour une meilleure flexibilité des procédés. Elle s'exprime autant par des méthodologies (par exemple, l'intensification des procédés, la conception innovante TRIZ<sup>1</sup> – raisonnement par étude de cas) que par des réalisations comme des membranes autoréparables. Les technologies numériques appliquées aux procédés facilitent ces innovations. Elles reposent notamment sur des concepts et technologies issues de l'Industrie 4.0 tels que l'Intelligence Artificielle, le Big Data ou encore le Cloud Computing, pour les plus connues. Ces technologies nécessitent des systèmes et des structures assurant une gestion de la connaissance et des informations concernant le procédé. L'objectif vise à favoriser sa reproduction ainsi que de consolider les compétences des personnels. Enfin, les considérations du développement durable sont intégrées à l'échelle du procédé lui-même mais aussi à l'ensemble de la chaîne de valeur.

La combinaison de toutes ces voies mène à une évolution de l'industrie de procédés vers le concept d'Usine du Futur. Ce concept a pour objectif de répondre aux enjeux actuels cités précédemment tout en intégrant les technologies numériques. Ainsi, le Génie des Procédés est une discipline incontournable dans cette quête d'une industrie plus propre, mieux intégrée dans son environnement et plus performante.

Plusieurs types de solutions sont déjà tournés vers cet objectif. Un premier type de solutions concerne les outils et méthodes d'ingénierie pour l'optimisation, la planification, la simulation et le

---

<sup>1</sup> Acronyme russe de la théorie de résolution des problèmes inventifs

---

contrôle de la production. D'ores et déjà employés dans des industries de procédés comme le pétrole ou encore le gaz, ces techniques permettent de garantir performance et optimalité aux différentes étapes de transformation. Néanmoins, ces sites de transformation sont généralement associés à des infrastructures imposantes. Ils nécessitent des coûts d'investissement et d'exploitation coûteux, financièrement et énergétiquement (pouvant être réduits selon un facteur d'échelle), pour une production à grande échelle, qui n'est pas nécessairement destinée à une demande de proximité.

Un second type de solution tend vers le développement d'une industrie de procédés modulaire où l'opération unitaire devient flexible et évolutive selon les objectifs de production. Cette modularité conduit à la construction de modules compatibles entre eux d'un point de vue matériel et théorique. Sur ce dernier point, les différentes voies de conception du procédé sont étudiées sur des aspects thermodynamiques, d'interface, de milieu, ou encore réactionnels. Les mécanismes en jeu sont nombreux, complexes et propres à chaque procédé. Le périmètre de ces pratiques concerne particulièrement le procédé et ses échelles inférieures.

Or, le procédé est soumis à de l'instabilité provenant de sources endogènes (c'est-à-dire propres au procédé lui-même) mais aussi de sources exogènes, notamment vis-à-vis des fluctuations générées par l'offre et la demande. C'est ainsi l'ensemble de la chaîne de transformation de la matière qui est impactée. Pour faire face à ces variabilités et dans la dynamique de l'Usine du Futur, il convient de revoir l'organisation et la structure du procédé mais également l'ensemble des opérations nécessaires à sa bonne exécution. Ce constat mène à un besoin d'agilité de la chaîne de transformation de la matière.

Depuis le début des années 1990, le concept d'agilité s'impose comme un moyen permettant aux entreprises de rester compétitives tout en prospérant dans des environnements incertains où le changement est imprévisible. Ce concept induit un virage notable de paradigme où le changement n'est plus une contrainte mais devient une opportunité résultant de l'adéquation de l'environnement et des capacités internes du système de production. (Nijssen et Paauwe, 2012) résumant en quelques mots l'objectif de l'agilité :

*« Ne plus gérer l'incertitude causée par ces dynamiques, mais l'accepter et s'organiser en conséquence »*

Alors que l'agilité fait l'objet d'une littérature dense concernant le Génie Industriel, ce concept fait l'objet de peu de travaux en ce qui concerne le Génie des Procédés. Et cela, alors même que l'industrie de procédés est soumise à de nombreuses variabilités. C'est notamment le cas de la transformation de la biomasse, qui constitue un exemple présentant de multiples variabilités, à différentes échelles. Cette matière première vivante d'intérêt pour la transition énergétique fait l'objet de nombreuses variations influençant le procédé (qualité, quantité, pureté de la matière première impactant la production) mais aussi directement la chaîne de transformation (de l'approvisionnement au produit final). Pour autant, l'organisation et la structuration actuelle de la transformation de la biomasse, héritées de la transformation du pétrole, sont limitantes pour s'adapter à des changements d'offre et de demande ou encore de localisation des usines de transformation.

Ainsi, ces travaux de recherche proposent un cadre méthodologique outillé pour apporter de l'agilité au sein de l'industrie de procédés. La finalité est de fournir un support d'aide à la décision pour la création de chaînes de transformation de la matière adéquates dans un contexte instable. Ce cadre sera expérimenté pour le cas de la transformation de la biomasse.

## 2. Problématique générale et objectifs

Plusieurs questions se posent concernant l'apport d'agilité dans la chaîne de transformation de la matière.

Traditionnellement, en Génie des Procédés, la transformation de la matière demande en premier lieu de déterminer le procédé adéquat. Il convient alors de sélectionner les opérations unitaires qui sont organisées puis interconnectées pour constituer le procédé souhaité. Cette démarche s'appuie sur les paramètres physico-chimiques, le comportement et le dimensionnement des opérations unitaires. Le procédé est quant à lui réalisé dans une usine centralisée et souvent rigide selon une matière première fixée. Ce point de vue centré sur le procédé rend difficile son adaptation en cas de changements endogènes ou exogènes. Ces derniers peuvent fortement modifier l'atteinte des objectifs de production. C'est ainsi toute l'organisation et la structure du procédé et par conséquent de l'usine (et de ses équipements) qui sont impactées.

Dans le cadre de cette thèse, le point de vue adopté est étendu au-delà du procédé. En effet, ce n'est pas le procédé seul qui est considéré, mais la chaîne de transformation. Cette dernière est considérée comme une succession d'étapes de transformation et d'opérations logistiques. Dans ce positionnement, la décentralisation du procédé s'avère être un levier pour apporter de l'agilité. Il est envisageable de composer une chaîne de transformation « à la carte », selon les contraintes et les besoins du moment. Cette approche fait appel à des services de transformation et des opérations logistiques qui s'appuient sur une collaboration de services d'acteurs. Cette nouvelle approche permettrait de fournir l'agilité requise et pertinente à la situation.

Ainsi, **la problématique centrale de ces travaux est relative à la création de chaînes de transformation de la matière pouvant s'adapter aux variabilités** précitées dans la section 1.

Cette problématique soulève les questions de recherche suivantes :

- Comment conceptualiser l'agilité pour l'industrie de procédés ?
- Quelle approche méthodologique pour développer l'agilité ?
- Comment implémenter l'agilité ?

Le cadre scientifique dans lequel s'inscrivent ces travaux sont précisés dans la section suivante.

## 3. Positionnement des travaux de recherche

### 3.1. Au sein du laboratoire de Génie Chimique

Cette thèse est réalisée au sein du département PSI (Procédés et Systèmes Industriels) du LGC (Laboratoire de Génie Chimique) à Toulouse, sous la direction de Stéphane Négny et Anne-Marie Barthe-Delanoë.

Au sein de ce département, les sujets de recherche s'intéressent à développer des méthodes et des outils logiciels génériques de modélisation, de simulation, d'optimisation et d'aide à la décision pour le Génie des Procédés. Ces problématiques s'appuient sur une approche systémique couplant les outils du Génie Industriel (gestion, supervision et analyse de performance de la production) et les sciences fondamentales (thermodynamique, mécanismes réactionnels en chimie). Les enjeux actuels sociétaux, énergétiques et environnementaux, ainsi que l'accroissement du numérique orientent les recherches du département PSI vers de nouvelles thématiques dont l'aide à la conception innovante des systèmes. À ce titre, la gestion de la connaissance est une des pistes utilisée pour fournir des solutions à ces enjeux.

Ces travaux se positionnent d'un point de vue disciplinaire à la croisée de l'approche systémique et de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles, et d'un point de vue applicatif sur la bioraffinerie, qui constitue l'un des six axes transversaux d'étude du LGC.

### 3.2. Dans le cadre du projet ARBRE

Par ailleurs, ces travaux de recherche sont menés dans le cadre d'un financement de l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) référencé ANR-17-CE10-0006 pour le projet ARBRE (Agilité pour les BioraffineRiEs). La philosophie de ce projet vise à dépasser la vision en silo et disciplinaire de l'écosystème des procédés de transformation de la matière et de l'énergie en développant une vision plus globale permettant d'identifier les synergies possibles au sein d'un territoire. Ce projet inclut les concepts et les technologies du numérique pour améliorer l'efficacité de la dynamique et de l'ensemble des fonctions de la chaîne de transformation de la matière.

L'objectif principal du projet ARBRE est de conduire à la servicisation des industries de procédés dans le domaine de la transformation de la biomasse. En effet, ce domaine d'application est particulièrement représentatif des différents types de contraintes endogènes et exogènes : complexité des voies de valorisation, complexité du contexte et des filières industrielles, multiplicité des entrants et des sortants, multiplicité des acteurs.

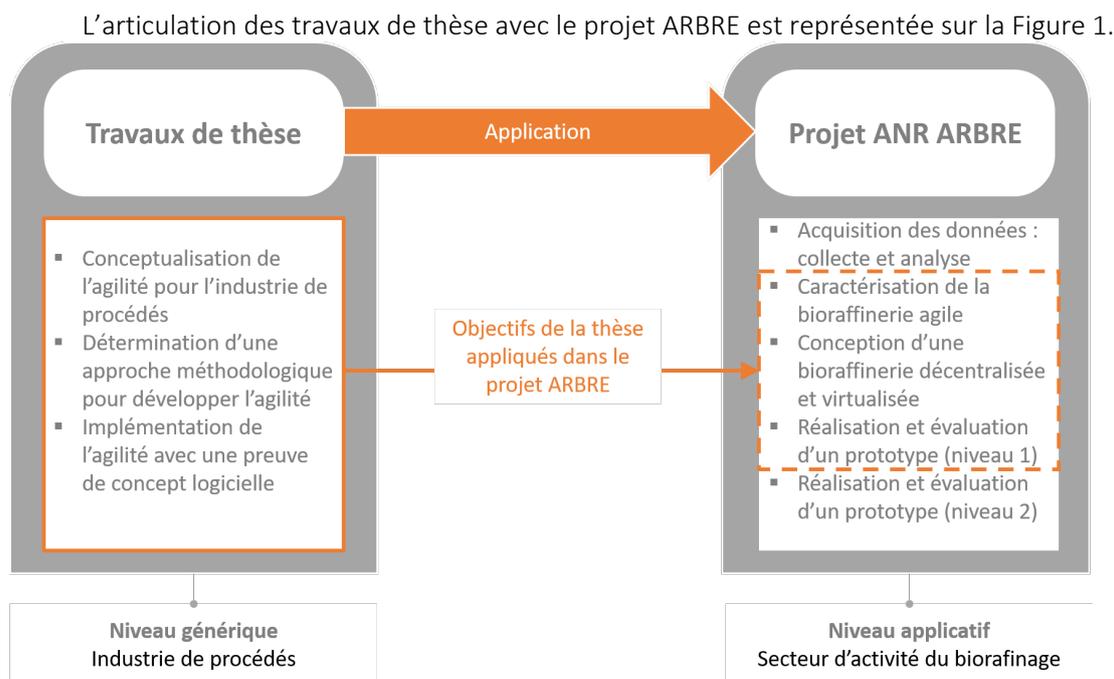


Figure 1 : Positionnement et périmètre des travaux de thèse par rapport au projet ARBRE

L'entreprise SOLAGRO a intégré ce projet en tant que membre du comité de pilotage. La présence de cette entreprise vient entériner la volonté d'adopter une approche métier réaliste. Créée en 1981, cette entreprise associative a pour objectif de promouvoir des pratiques et des techniques économes en ressources naturelles, dans les domaines de l'énergie, de l'agriculture et de la forêt. À ce titre, elle développe une expertise auprès des acteurs économiques et institutionnels au sujet des énergies renouvelables. Son large périmètre d'action touche aussi bien les agriculteurs dans leur démarche agroécologique que l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) au sujet de la méthodologie d'élaboration des stratégies nationale et régionale de la valorisation de la biomasse.

## 4. Organisation du manuscrit

Le manuscrit se compose de huit parties : la présente **introduction générale**, six chapitres et une conclusion générale. La structuration du manuscrit est illustrée dans la Figure 2.

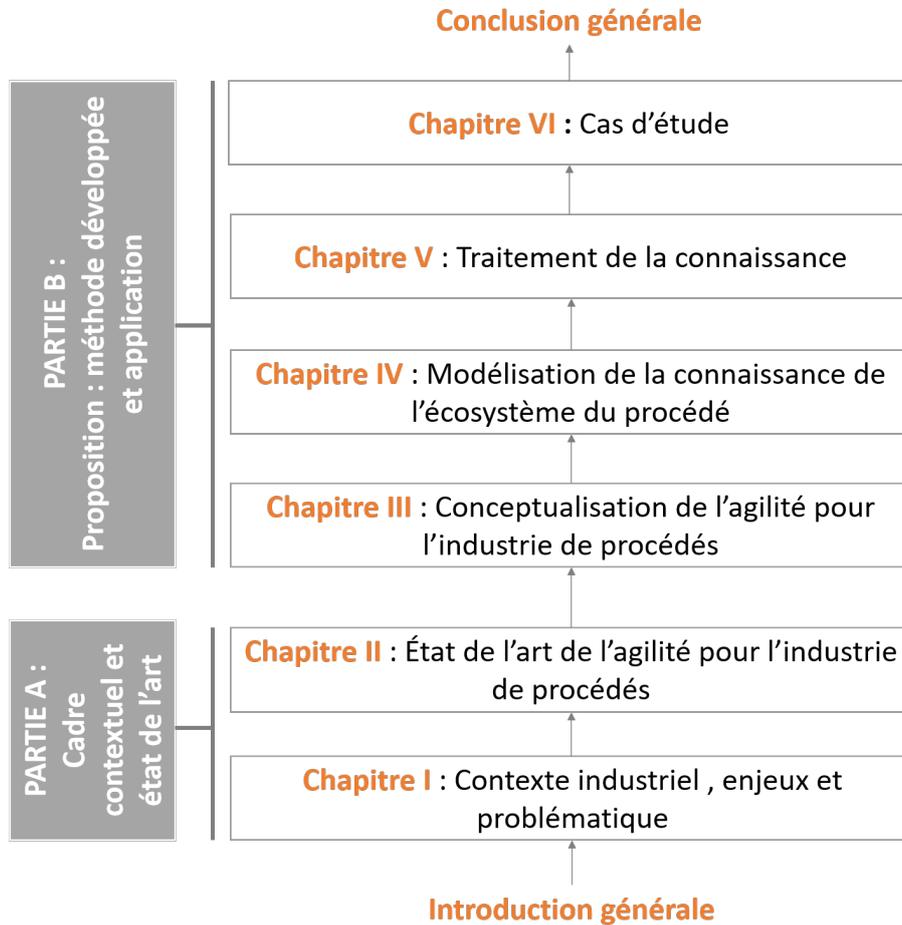


Figure 2 : Introduction : Schéma d'illustration de l'organisation du manuscrit

La partie A contient les chapitres I et II qui détaillent le contexte industriel, les enjeux, les problématiques métier et scientifique ainsi que l'état de l'art concernant l'agilité pour l'Industrie de Procédés.

Le chapitre I a pour objectif de présenter le contexte industriel, les enjeux et la problématique métier. Pour commencer, un état des lieux de l'industrie de procédés dans le contexte actuel est effectué. Ce dernier souligne le besoin d'agilité du système de production. Par la suite, il est détaillé le type de production visée dans ces travaux. Puis, il est mis en évidence des thématiques structurantes de l'industrie de procédés qui sont amenées à évoluer sous l'impulsion du de l'Usine du Futur. En se basant sur les perspectives d'évolution de ces thématiques en matière d'agilité, la problématique métier est définie et les hypothèses de travail sont explicitées.

Le chapitre II présente un état de l'art de l'agilité pour l'industrie de procédés suivant quatre grandes étapes. La première étape consiste à définir l'agilité pour l'industrie de procédés. Elle aboutit au choix d'une définition de l'agilité applicable à tout système complexe selon quatre axes : la détection, l'adaptation, la réactivité et l'efficacité. En l'absence de conceptualisation de l'agilité pour l'industrie de procédés, une évaluation des termes proches de l'agilité est menée dans la deuxième étape. Parmi ces

---

termes, la flexibilité et la modularité sont davantage explicités compte tenu de leur niveau de maturité élevé de mise en œuvre dans l'industrie de procédés. Les troisième et quatrième étapes se concentrent respectivement sur les cadres de mise en œuvre l'agilité dans le Génie des Procédés et dans le Génie Industriel. Au terme de cette revue de littérature, des concepts pouvant soutenir l'agilité dans l'industrie de procédés sont mis en lumière. Ces derniers constituent la base de notre approche de conceptualisation. Par la suite, le cadre de notre proposition est dressé, pour déterminer l'approche qui sera mise en œuvre dans la thèse.

**La partie B contient les chapitres III, IV, V et VI. Elle dévoile notre proposition pour fournir de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière. Cette proposition se compose d'une phase de conceptualisation de l'agilité puis d'une phase de développement d'un cadre méthodologique avant une application à travers un cas d'étude.**

**Le chapitre III** fait état de notre proposition pour apporter de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière. Elle s'appuie sur une vision système, la collaboration et la servicisation. Ces concepts qui ouvrent la voie vers une réorganisation du procédé et des opérations logistiques associées, en dehors de la structure monolithique traditionnelle. Cette proposition pose notre cadre méthodologique qui comporte une phase de modélisation de la connaissance de l'écosystème du procédé suivi d'une phase d'exploitation de cette connaissance.

**Le chapitre IV** détaille la première partie de notre cadre méthodologique. Ce cadre a pour objectif de modéliser l'écosystème de la situation collaborative du procédé. L'enjeu repose sur la structuration de la connaissance adéquate de l'écosystème du procédé, c'est-à-dire du procédé lui-même et de son environnement. Afin d'adopter une approche générique, notre démarche de modélisation s'appuie sur l'Ingénierie Dirigée par les Modèles. Après avoir fait une revue des approches existantes, notre méta-modèle de l'environnement du procédé est spécifié selon le contexte, les partenaires, l'objectif de collaboration et la performance de la collaboration. Il est issu d'une spécification du méta-modèle CORE de (Bénaben et al., 2016) générique à toute collaboration. Le cadre méthodologique est complété par un méta-modèle de la connaissance sur les procédés d'un point de vue des opérations de transformation pertinentes et de leur enchaînement.

**Le chapitre V** aborde la seconde partie de notre cadre méthodologique. Ce chapitre traite de l'exploitation de la connaissance pour déduire la chaîne de transformation de la matière pertinente, selon la situation collaborative. Cette exploitation de la connaissance implique une sélection et un séquençage des services pertinents tout en s'assurant de la cohérence des exigences fonctionnelles et non fonctionnelles des services. Une revue des mécanismes de déduction de la construction des réseaux collaboratifs existants aboutit à la proposition d'un algorithme de déduction. Après avoir déterminé les services de transformation disponibles, l'algorithme fait émerger le(s) procédé(s) possible(s). Puis, l'application de filtres temporel, géographique et de production couplés à l'ajout des services logistiques, requis entre les services de transformation, permet l'émergence de la (des) chaîne(s) de transformation de la matière réalisable(s).

**Le chapitre VI** présente l'outil logiciel développé pour la déduction de la chaîne de transformation. Il implémente l'algorithme de déduction et est testé sur un cas d'étude basé sur des données réelles relatives à la transformation de la biomasse. Les résultats obtenus sont discutés. Par la suite, la dynamique de l'agilité selon le type de changement détecté dans l'écosystème est étudiée. Cette introduction de variabilités s'établit à plusieurs niveaux : des changements au niveau de la disponibilité d'un service proposé par un acteur, des changements de caractéristiques de la biomasse et des changements de l'offre et de la demande. Les résultats de cette analyse de sensibilité sont discutés dans la perspective de la validation du prototype logiciel.

Enfin, la **conclusion générale** synthétise et reprend les contributions de ces travaux de thèse en les mettant en regard avec les questions de recherche et les hypothèses de travail établies dans le Chapitre I. Elle s'achève sur des perspectives alimentant les réflexions et les évolutions concernant l'implémentation de l'agilité dans l'industrie de procédés.

**PARTIE A : CADRE  
CONTEXTUEL ET ETAT  
DE L'ART**

---



# Chapitre I. Contexte industriel, enjeux et problématique

---

Communément associée à la légèreté, la souplesse, la rapidité dans l'exécution des mouvements ainsi qu'à la vivacité et la promptitude dans les opérations intellectuelles, la popularité de l'agilité que ce soit dans les sphères industrielle et universitaire n'est plus à démontrer. Ces dernières années, cette notion s'impose dans les domaines de la production manufacturière. Et qu'en est-il dans le domaine de la transformation de la matière dans l'industrie de procédés ?

Face à cette interrogation, ce chapitre identifiera dans une première partie les facteurs justifiant le besoin de systèmes de production agiles, dans le contexte actuel, pour l'industrie de procédés. Après avoir explicité la problématique métier, les enjeux majeurs de l'industrie de procédés seront présentés dans une deuxième partie. Par la suite, dans une troisième partie, nous présenterons le périmètre de notre cadre de recherche qui mettra en évidence la problématique métier qui s'y rapporte, les axes de travail ainsi que le cas d'application

## I.1. Contexte de l'industrie de procédés

### I.1.1. Notion de procédé

La chaîne de transformation de la matière nous amène à nous intéresser à l'industrie de procédés.

Selon la norme ISO 10628-1 :2014 (ISO, 2014) un **procédé** est défini comme :

*« Une suite d'opérations chimiques, physiques ou biologiques nécessaires pour la transformation, le transport et le stockage de matériaux ou d'énergie. »*

La notion d'opération est à rapprocher du concept d'opération unitaire introduit par A.D. Little au début du XXème siècle comme moyen d'expliquer le fonctionnement des procédés industriels. Traditionnellement, une opération unitaire est une étape de base qui ne contient qu'un type de transformation chimique, physique ou biologique. Il est à noter que dans le cas spécifique de l'intensification des procédés, les équipements multifonctionnels peuvent hybrider les opérations unitaires, c'est-à-dire intégrer une autre opération unitaire traditionnellement réalisée dans un autre équipement. (Walker et al., 1923) développent le concept de l'opération unitaire, posant ainsi les prémices du Génie des Procédés en tant que discipline. Une définition du Génie des Procédés est donnée par Jacques Villiermaux (Legrand, 2017) comme étant :

*« L'ensemble des connaissances nécessaires pour concevoir, analyser, développer, construire et faire fonctionner d'une manière optimale des procédés dans lesquels la matière change de forme, d'état d'agrégation ou de dispersion, d'état physique ou de propriétés physico-chimiques, de nature chimique. »*

Parmi les différentes représentations du procédé présentées dans la norme suscitée, deux types de schémas complémentaires sont fréquemment utilisés : le schéma de principe (ou schéma bloc fonctionnel) qui décrit l'enchaînement des différentes étapes de transformation et le plan de circulation des fluides (ou schéma procédé) qui représente les équipements du procédé comprenant les tuyauteries et les alimentations en utilités (Giroudiere, 2016). Dans la suite de ce manuscrit, le schéma bloc sera privilégié comme présenté sur la Figure I-1. En effet, ce schéma, simple et clair, présente les paramètres essentiels du procédé à savoir les fonctions à assurer (les blocs) ainsi que les flux de matière entrant et sortant de chaque bloc (les flèches orientées). Il correspond à notre besoin en ce qui concerne le niveau de détails requis pour décrire un procédé agile. De plus, le schéma bloc ne demande pas de symbolique particulière.

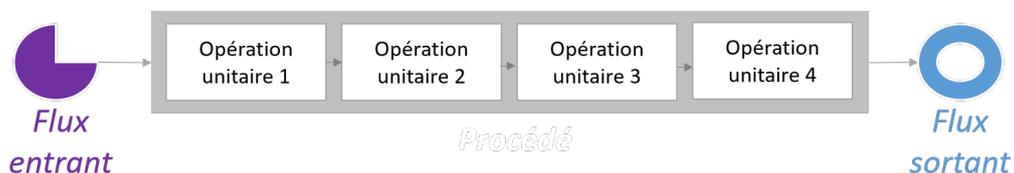


Figure I-1 : Schéma bloc général d'un procédé (vision simpliste)

Le Génie des Procédés touche une multitude de secteurs d'activités : chimique, pharmaceutique, cosmétique, agro-alimentaire, de l'énergie ou encore des matériaux. Le but de l'industrie de procédés est de transformer la matière par des processus chimiques, physiques et/ou biologiques. Le produit de cette transformation est destiné soit à approvisionner l'industrie manufacturière (transformation de biens), en énergie et/ou en matière première, soit à approvisionner directement des clients finaux (SFGP, 2017). Comme tous les secteurs industriels, l'industrie de

procédés ne cesse d'être impactée par différentes sources de changement depuis la première révolution industrielle.

### I.1.1. Évolutions économiques et sociales

Les différents paradigmes de production qui se sont succédés depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, de la production artisanale jusqu'à une production dite de personnalisation de masse de nos jours, répondent à des évolutions sociétales pour une demande de plus en plus changeante.

À cet effet, la personnalisation de masse combine la volonté de faire correspondre, au plus près et au plus vite, les besoins du client tout en maintenant un coût de la production de masse (Koren, 2005, 2010). Ce type de production propose la possibilité de lever des « options » par rapport à un produit de base. Selon (Sardin, 2017), pour suivre l'évolution des exigences du marché, la conception des procédés doit être flexible et adaptable afin de permettre la polyvalence des installations, à toutes les échelles du procédé. Ces systèmes flexibles et adaptables ont été intégrés à l'industrie de procédés au début des années 2000 au sein de procédés pharmaceutiques grâce à des modules dont l'agencement pouvait changer en quelques heures (Stec et al., 2003). De plus, allant dans le sens de la personnalisation de masse, l'intensification des procédés développe des techniques, des méthodes et des appareils pour la conception de procédés plus compacts (rapport taille de l'équipement / capacité de production) et économiques (d'un point de vue coût, énergie, production de déchets) à différentes échelles de temps et d'espace (depuis l'échelle moléculaire jusqu'au site de production industriel) (Stankiewicz et Moulijn, 2000). En quelques mots, cette approche peut se définir par « Produire beaucoup plus et mieux en consommant beaucoup moins »

De plus, la mondialisation à l'origine d'une forte concurrence entre les acteurs industriels joue un rôle important dans les évolutions de l'industrie. La mondialisation est portée par l'impulsion des changements de législations gouvernementales (vers plus de sécurité, vers plus de durabilité), l'expansion de l'industrie de procédés aux pays émergents ainsi que le développement des réseaux de communication (Koren, 2010) comme synthétisé sur la Figure I-2.

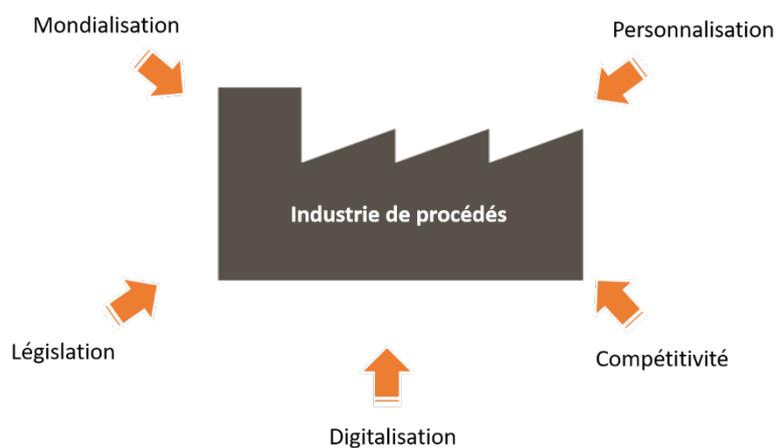


Figure I-2 : Facteurs principaux influençant l'industrie de procédés

### I.1.2. Évolutions technologiques

Parallèlement, aux paradigmes de production, les évolutions technologiques n'ont cessé d'impacter l'industrie de procédés. Depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle, plusieurs révolutions technologiques se sont succédées toujours plus complexes, automatisées et durables afin de rendre l'usage et l'exploitation

des machines par l’homme plus simple, efficace et continue (Vaidya et al., 2018), comme précisée sur la Figure I-3.

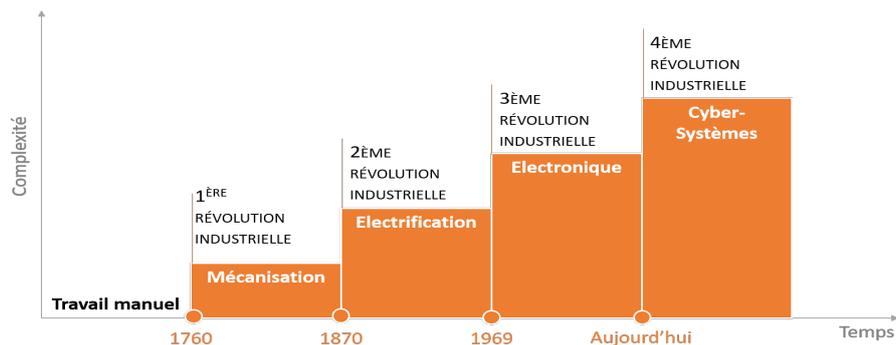


Figure I-3 : Chronologie des révolutions industrielles adaptée de (Kohler et Weisz, 2017; Vaidya et al., 2018)

Le concept d’Industrie 4.0, représentatif de cette nouvelle ère, est apparu en l’Allemagne en 2011 à l’initiative du gouvernement fédéral allemand (Hermann et al., 2016). Depuis, différentes déclinaisons se sont succédées dans les sphères industrielles et universitaires, à travers le monde: Integrated industry, Industrial Internet, Smart production, Smart Manufacturing, Smart factory, Factory of the future, Manufacturing 4.0, Advanced Manufacturing, Intelligent Manufacturing, Industry of the future, High value manufacturing, Digital Factory, Manufacturing Renaissance (Tableau I-1). Malgré leur diversité, ces programmes font tous référence à la quatrième révolution industrielle selon les pays et les auteurs.

La quatrième révolution industrielle se caractérise par un changement de paradigme marqué par le passage d’une production centralisée vers une production intelligente décentralisée (Hermann et al., 2016). Cette « Smart Manufacturing » correspond à :

*« Un système de production complètement intégré et collaboratif qui réagit en temps réel afin de répondre aux demandes changeantes et aux conditions au sein de l’usine, du réseau d’approvisionnement et des besoins du client. » (Wiktorsson et al., 2018)*

Intitulé du programme	Pays	Intitulé du programme	Pays
Industry 4.0 platform		Factories of the Future	
Smart Industry		Industries du Futur	
Connected Industry		Produktion 2030	
Catapult Centers		Made in China 2025	
Industrie 4.0		Make In India	
Manufacturing Innovation 3.0		Advanced Manufacturing Partnership 2.0	

Tableau I-1 : Sélection de programmes faisant référence à la quatrième révolution industrielle dans le monde (Danjou et al., 2017; Hermann et al., 2016)

Ces programmes laissent apparaître une tendance mondiale vers des activités de production adaptables, connectées et automatisées à l’origine de différents programmes impulsés par les pouvoirs publics. Toutefois, une nuance est à apporter en précisant que les pays dits développés et émergents sont particulièrement actifs dans ce domaine.

Les technologies et les concepts associés à l’Industrie 4.0 sont en constante évolution (Prinsloo et Van Deventer, 2017) comme le souligne chaque année la représentation graphique de Gartner (Gartner, 2020) du cycle de maturité des dernières tendances technologiques. En évoquant l’Industrie

---

4.0, les technologies et concepts les plus fréquemment citées sont : le robot autonome, la fabrication additive, la réalité augmentée, la simulation, l'intégration horizontale et verticale des systèmes, l'Internet des Objets Industriels, l'environnement Cloud, la cybersécurité et le Big Data et son analyse (Alcácer et Cruz-Machado, 2019; Vaidya et al., 2018). La description de ces technologies et concepts est présentée dans l'Annexe 1.

## I.2. Industrie de procédés au cœur du nouveau industriel : les enjeux

### I.2.1. Nécessité d'un changement de paradigme de production

Parmi les trois grands chantiers identifiés par (Uhlemann et al., 2019) pour que l'Industrie de Procédés puisse faire face aux évolutions et aux changements sociétaux, deux d'entre eux sont en rapport avec des modifications de la production que ce soit dans les pratiques ou le positionnement.

Le premier chantier se tourne vers l'innovation. Selon (Bogle, 2017), l'innovation est supportée par de nouvelles approches tournées vers des modèles économiques disruptifs qui reposent sur les technologies et les concepts de l'Industrie 4.0. De plus, cette production à plus petite échelle doit être ancrée sur le territoire pour des produits au plus proche des besoins du consommateur final. Le second chantier s'oriente vers la prise en compte de l'intégration des services dans l'industrie de procédés pour une meilleure prise en compte de la personnalisation des besoins. Il s'appuie également sur les technologies et concepts de l'Industrie 4.0 (Qian et al., 2017).

Ces deux chantiers sont complémentaires. Leur articulation contribue à accompagner l'industrie de procédés pour faire face aux transitions actuelles.

L'industrie de procédés est un acteur incontournable de la conception, du développement et de l'amélioration du fonctionnement de la chaîne de transformation (Bakshi et Fiksel, 2003). Sur ce dernier point, le Génie des Procédés couvre toutes les échelles spatio-temporelles du procédé : de l'échelle nanoscopique à l'échelle du réseau d'organisations (Barbosa-Povoa et Pinto, 2020). Par ailleurs, les dimensions sociétale, économique et environnementale sont également à intégrer afin d'avoir une vision globale du procédé, dans toute sa complexité.

Ces considérations sont reprises et complétées par la SFGP qui préconise de manière très explicite un « changement de mentalité » (SFGP, 2017) passant par :

- Le développement de l'analyse multicritère couplée à une production personnalisée incluant le produit et le service,
- Le développement de l'interdisciplinarité avec les Sciences Sociales, les Sciences Économiques, les Sciences du Vivant,
- Le développement de la digitalisation de l'usine de production,
- Le développement de procédés flexibles et robustes grâce à des mécanismes d'interaction entre le procédé et ses équipements.

Les transitions technologiques, environnementales et sociétales affectent le développement de la production en Génie des Procédés. Cette section a donné un aperçu des enjeux auxquels cette industrie doit faire face. Ces enjeux et défis soutenus par les grandes tendances de l'Industrie 4.0 et de l'instantanéité de la demande changeante et instable se retrouvent également dans les services présents au sein de l'industrie.

### I.2.2. Essor des services dans l'industrie

Aujourd'hui, le terme service est omniprésent. Dans le cadre de ces travaux, nous nous concentrerons sur le service tel qu'il a été défini par l'INSEE :

*« Une activité de services se caractérise essentiellement par la mise à disposition d'une prestation technique ou intellectuelle. À la différence d'une activité industrielle, elle ne peut pas être décrite par les seules caractéristiques d'un bien tangible acquis par le client. Son produit final est immatériel, il n'est ni stockable, ni transportable. »*

Cette définition met en évidence les constituants d'un service. Tout comme un produit tangible, celui-ci répond à la satisfaction d'un besoin ou d'un souhait émis par un marché. Ainsi, dans une **logique dominante de produit** marqué par la valeur d'échange, (Kotler et Armstrong, 2018) considèrent le service comme un type de produit spécifique avec des caractéristiques propres : l'intangibilité, la variabilité, la périssabilité et l'inséparabilité Figure I-4.

Le service est **intangible** c'est-à-dire qu'il n'existe pas physiquement. Il ne peut donc pas être testé avant d'être acheté par un client. Afin de diminuer les incertitudes liées à cette intangibilité, les clients accordent une importance à la qualité du service rendu. Véritable outil de compétitivité, la qualité de service évalue le niveau avec lequel le service a répondu aux attentes du client. Ce dernier est directement impliqué dans le processus de réalisation du service (Ghobadian et al., 1994). C'est pourquoi le résultat mais aussi l'ensemble du processus du service sont importants dans la perception de la qualité de service perçue par le client.

Le service est **variable**. La qualité du service est contexto-dépendante. En effet, elle est liée à la personne qui le fournit (QUI), à quel moment (QUAND), à quel endroit (OÙ) et de quelle manière (COMMENT).

Le service ne peut pas être stocké en vue d'une vente ou d'une utilisation extérieure, ce qui le rend particulièrement **périssable**. Pour pallier les incertitudes et l'instabilité de la demande, cela nécessite des démarches stratégiques (ajustement du personnel selon l'affluence des clients, ajustement du prix aux besoins du client selon la saisonnalité, etc.) pour faire correspondre au mieux l'offre et la demande.

Le service ne peut être séparé de son fournisseur. Il devient **inséparable** de son émetteur qui devient lui-même une partie du service. Les clients font plus qu'acheter et/ou utiliser le service : ils participent à sa fourniture. Le fournisseur du service et le client ont tous deux un impact sur le résultat du service : il s'agit du principe de coproduction.



Figure I-4 : Caractéristiques du service selon (Kotler et Armstrong, 2018)

---

En dehors de la logique produit, le service peut aussi être perçu selon une **logique marquée par sa valeur d'usage** (Dahmani, 2015). C'est ainsi l'usage qui est vendu et non le produit, autrement dit, la valeur économique repose sur une performance d'usage (ADEME et al., 2017). Cette logique gagne du terrain dans le domaine industriel.

En effet, d'un point de vue macroscopique, (Brax et Visintin, 2017) montrent, au travers de statistiques à l'échelle mondiale et européenne au début des années 2000, un véritable engouement pour une offre de services intégrés aux activités de transformation industrielles, même si cet engouement est inégal selon les pays. En France, les services (comprenant les services commerciaux et administratifs, l'installation et la maintenance, le contrôle-qualité, la logistique et la recherche et développement industrielle) occupent plus de la moitié des emplois directs du secteur de la production industrielle selon les rapports de l'(INSEE, 2016, 2019).

Les technologies et les concepts de l'Industrie 4.0 ouvrent la voie vers de nouvelles approches de production dans l'industrie de procédés. Ils contribuent à répondre aux enjeux identifiés dans la section I.2.1.

### I.2.3. Intégration des concepts et des technologies de l'Industrie 4.0

D'un point de vue global, (Qian et al., 2017) dressent un cadre de développement pour une production optimale et intelligente concernant la transformation de matière comme le gaz ou le pétrole. Ce cadre contient quatre axes :

- Une numérisation des usines avec la généralisation du concept et des outils du Big Data,
- Le recours massif à l'intelligence artificielle pour les processus de production et la prise de décision,
- Des dispositifs basés sur les systèmes cyber physiques et l'internet des objets,
- Une automatisation de la production grâce à la mise en œuvre de capteurs.

À cet effet, différentes technologies de l'Industrie 4.0 ont été mises en œuvre au sein de démonstrateurs dans les secteurs de la pétrochimie (Yuan et al., 2017), de la transformation de l'acier (Moreno et al., 2017) ou du traitement des déchets (Ghobakhloo, 2020). Le développement de ce type de démonstrateurs conforte le rôle à jouer des concepts et les technologies de l'Industrie 4.0 pour un meilleur contrôle de la production tout en permettant de répondre rapidement aux demandes des clients.

La section I.2 met en évidence la nécessité d'une transformation de la matière qui s'adapte aux changements du client mais aussi de l'environnement de production, en garantissant un niveau de production optimale grâce aux technologies de l'industrie 4.0. Ainsi, la problématique métier de ces travaux de recherche se dégage du contexte et des enjeux évoqués précédemment. Elle est synthétisée par la question suivante :

**Problématique  
métier**

**Comment garantir une transformation efficace de la matière compte-tenu de l'instabilité de l'environnement de production dans un contexte territorial ?**

Ce questionnement permet d'explicitier l'objectif et le périmètre de ces travaux de recherche.

### I.3. Cadre de recherche des travaux de thèse

#### I.3.1. Vers une approche disruptive

Les sections précédentes soulignent que la production en Génie des Procédés doit être en mesure de détecter et d'anticiper les changements, afin de se rapprocher au plus près des besoins du client. Ce positionnement requiert des systèmes de production innovants. Ici, l'innovation ne tient pas compte uniquement de l'aspect technologique mais aussi de l'aspect organisationnel. Dans ce contexte, l'agilité est une notion présentant plusieurs intérêts.

En effet, le besoin d'agilité est motivé par différents aspects. Dans un premier temps, l'ensemble du système doit être conscient de la dynamique de l'environnement dans lequel il se place (marché, matière première disponible, produit attendu, etc.). Dans un second temps, le procédé doit être capable de comprendre et d'intégrer ces changements. Dans un troisième temps, cette détection et cette compréhension des changements conduisent à une adaptation de l'ensemble de la chaîne de transformation dans son ensemble (service, équipement).

Plusieurs auteurs comme (Ghobakhloo, 2020; Kamble et al., 2018; Qian et al., 2017; Yuan et al., 2017) estiment que l'agilité est un aspect majeur d'une production dite intelligente notamment pour améliorer les performances de la production en cas de variations de matière première, d'offre et de demande ou encore de prix. Même si l'agilité demeure essentielle, aucune de ces recherches ne fait état d'un cadre, d'une démarche ou d'outil permettant la mise en œuvre de l'agilité dans l'industrie de procédés.

Toutefois, sur la base d'une industrie plus intelligente, les travaux de (Bogle, 2017) se distinguent. Ces derniers esquissent les grands axes de l'implémentation de l'agilité dans l'industrie de Procédés basés sur la création de modèles d'affaires disruptifs et durables prenant en compte :

- Une intégration de l'usine dans son environnement,
- Une évolution des échanges d'information entre l'ensemble des parties prenantes de la chaîne logistique ainsi qu'entre les unités de transformation : pour une efficacité plus grande des technologies de l'Industrie 4.0,
- Un changement d'échelle de production : une échelle de production en plus faible quantité ayant une forte valeur ajoutée pour satisfaire des besoins de proximité,
- Une personnalisation de la production : une production plus personnalisée qui se rapprocherait au plus près des besoins du consommateur final

C'est dans le contexte des travaux de (Bogle, 2017) que se positionnent ces travaux. En effet, cette thèse ne vise pas à mettre en œuvre l'agilité dans une industrie de production continue comme c'est le cas dans une raffinerie pétrochimique. La production visée est d'avantage de type batch ou semi continue. L'approche souhaitée s'inscrit en rupture avec les approches traditionnelles de l'industrie de procédés.

#### I.3.2. Problématique scientifique

L'agilité s'est installée dans le Génie Industriel comme étant une approche permettant de traiter les incertitudes, ou plus généralement ce qui n'est pas contrôlable (Maskell, 2001). De plus, (Hormozi, 2001) estime que l'agilité est une approche nécessaire pour faire face au contexte actuel. (El Maraghy, 2019) abonde dans ce sens et précise qu'un changement de paradigme est nécessaire. (Wiendahl et Hernández, 2006) ajoutent que l'agilité représente une capacité de réponse stratégique la plus à même de permettre une résistance aux changements et aux turbulences de l'environnement de l'industrie.

---

La relation étroite entre le produit et le service couplée à la prise en compte des incertitudes socio-économiques nécessite des systèmes de production agiles. Clairement définie dans des secteurs comme la transformation manufacturière (Agile Manufacturing) ou encore la gestion de projet (Agile Methods), l'agilité dans l'industrie de procédés ne dispose pas d'approche propre (Bogle, 2017). Et cela alors même que garantir la transformation de la matière compte-tenu l'instabilité de l'environnement de production est un enjeu majeur du Génie des Procédés.

Ainsi, la problématique scientifique à laquelle ces travaux vont tenter de répondre est :

Problématique  
scientifique

Comment apporter de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière en  
tenant compte des variabilités de son écosystème ?

Cette problématique mène à l'exploration de champs de recherche dans le Génie des Procédés. Ces derniers constitueront nos axes de travail.

### I.3.3. Axes de développement de l'agilité pour le Génie des Procédés

L'Industrie 4.0 ouvre la voie vers de nouvelles recherches dans des thématiques majeures de l'industrie de procédés. Parmi elles, les thématiques ci-dessous représentent nos principaux axes de travail pour l'apport d'agilité à la chaîne de transformation de la matière.

#### I.3.3.1 Usine du Futur

La notion d'Usine du Futur n'est pas nouvelle. En effet, dès le début des années 1980, des questionnements sur une amélioration de l'organisation de l'usine, la prise de décision et les interactions avec les utilisateurs ainsi que les fournisseurs ont été menées (Rosenthal, 1984). Qu'en est-il de l'intégration de l'Usine du Futur et de l'industrie de procédés ?

Dans cette optique de vision croisée (en France) la SFGP considère l'Usine du Futur comme un défi industriel et de recherche majeur au sein du Génie des Procédés (SFGP, 2019):

*« L'usine du futur sera flexible et s'adaptera aux fluctuations des besoins – en s'appuyant sur une conception modulaire des équipements – à la variabilité de matières premières biosourcées ou issues du recyclage (économie circulaire) et à la transition énergétique. »*

Cette Usine du Futur se doit de produire différemment et mieux. Elle est tournée vers le numérique. La digitalisation représente un moyen de proposer de nouveaux modes de production qui s'appuient sur une meilleure gestion des flux de production, un meilleur contrôle des procédés et une intensification des procédés. La gestion des données et de la connaissance représente un des aspects cruciaux pour la digitalisation de l'industrie de procédés. De plus, l'Usine du Futur est intégrée dans son territoire. Enfin l'Usine du Futur offre une certaine flexibilité et une adaptation rapide aux besoins des clients. C'est pourquoi, l'agilité est une approche primordiale qui s'inscrit dans les principes de l'Usine du Futur (Qian et al., 2017).

#### I.3.3.2 Chaîne de transformation de la matière

La chaîne de transformation de la matière regroupe une diversité d'acteurs, de matière et d'informations dans le temps mais également dans l'espace (Barbosa-Povoa et Pinto, 2020). Cette diversité multi-échelle génère des variabilités d'ordre technique (réglages d'équipements), technologique (choix des technologies du procédé) et logistique (stratégie d'approvisionnement,

transport de la matière entre les acteurs) à l'origine d'irrégularités de fonctionnement sur le procédé. Ceci, alors même que les usines dans lesquelles les transformations ont lieu, restent principalement rigides, tant dans l'infrastructure qu'au niveau du procédé (SFGP, 2017).

Dans ce contexte et afin d'améliorer les performances de l'industrie de procédés, les différentes méthodes d'optimisation et de simulation permettent d'anticiper les effets des variabilités. Elles permettent d'assurer une capacité de production optimale tout en intégrant des critères relatifs au développement durable (Koberg et Longoni, 2019).

De même, la modularité est employée dans l'industrie de procédés au moins depuis les années 1960 ((Glaser et al., 1979). Ce concept s'applique selon différentes échelles de la structure du procédé mais aussi de l'usine, où le module peut être considéré comme un bloc LEGO possédant une fonction autonome (Hohmann et al., 2017). L'approche modulaire s'appuie sur la combinaison de ces blocs selon des complémentarités de fonctions et d'interfaces dont l'objectif global est d'accroître la compétitivité globale de l'industrie des procédés (Baldea et al., 2017).

Pour autant, il n'en reste pas moins que dans la dynamique de l'Usine du Futur qui prône cette modularité, il est opportun de se questionner sur les évolutions à apporter quant aux modes de production, au niveau des flux de matière. Des auteurs (Akhavei et Kreuzer, 2016; Cao, 2017; Christopher, 1999; Stec et al., 2003) suggèrent de favoriser l'interopérabilité des systèmes de production pour mettre en œuvre de l'agilité au sein de la production par une harmonisation des équipements (par la standardisation par exemple) et un meilleur échange entre les différentes composantes de la production. Ainsi, l'agilité repenserait l'organisation de la chaîne de transformation de la matière.

#### I.3.3.3 Infrastructures et réseaux d'acteurs de l'industrie de procédés

D'un point de vue structurel, selon (Laínez et Puigjaner, 2012) deux grands types de configuration de réseaux se distinguent au sein de la chaîne de transformation de la matière :

- Un réseau centralisé dans lequel une entité concentre la majorité des activités au sein de sa structure physique, où un même acteur gère l'ensemble des usines. Cette entité centrale possède également une visibilité globale sur l'ensemble des activités réalisées par les autres acteurs. Par conséquent, les mécanismes de prise de décision sont majoritairement aux commandes de cette entité.
- Un réseau décentralisé où les activités sont réalisées dans les différentes structures du réseau et les décisions sont prises séparément par les acteurs, en ce qui concerne leurs activités pour parvenir à un objectif commun.

Selon (Stephanopoulos et Reklaitis, 2011), la transformation de la matière a été largement étudiée pour un seul et même site de transformation. Ces usines, peu nombreuses et indépendantes, sont construites sur mesure soit pour la production de masse, soit pour répondre aux besoins personnalisés du client. Quel que soit le type de production mise en œuvre, les coûts d'investissements élevés en termes de construction et de gestion opérationnelle ne permettent généralement pas de gains substantiels à court terme (Weber et Snowden-Swan, 2019).

Par ailleurs, ces structures sont vues comme manquant de flexibilité (Lipphardt et al., 1993). C'est pourquoi, dans la perspective qui prend en compte l'ensemble de la chaîne de transformation, la décentralisation de la production s'avère être une alternative intéressante, qui se manifeste par des structures physiques (usines) dites distribuées. Bien qu'un système décentralisé présente des difficultés liées à la dispersion des activités dont la synchronisation est nécessaire que ce soit d'un point de vue physique (usines, ateliers, lignes de production) et temporel (dynamique de production, logistique,

---

stockage) (Stephanopoulos et Reklaitis, 2011), ce type de système comporte des points positifs. Par exemple, dans le domaine de la transformation de l'énergie, selon (McKenna, 2018) les unités décentralisées sont généralement de petite taille (contrairement à une gestion centralisée) tenues par des parties prenantes intégrées au territoire, ce qui favorise leur acceptabilité sociale. La prise de décision concernant l'investissement et l'exploitation est plus rapide et flexible de par la taille de la structure. De plus, la régulation des besoins en énergie est facilitée en raison de la proximité des clients.

La décentralisation de la transformation de la matière ouvre la voie vers une approche modulaire selon deux niveaux à considérer. Le premier niveau est de l'ordre de la distribution géographique des modules. En effet, plusieurs modules aux fonctions identiques ou différentes peuvent être répartis sur différents lieux au sein d'un même territoire. Le second niveau est de l'ordre de la gestion des modules. Un ou plusieurs modules peuvent être gérés par un ou plusieurs acteurs. Ainsi, prendre en compte des modules de taille plus réduite et déjà présents sur un territoire où les acteurs sont intégrés au tissu économique et social favoriserait un meilleur ancrage territorial des activités de transformation de la matière ainsi qu'une meilleure acceptabilité sociale. En effet, les usines, généralement de taille imposante, pâtiennent d'une vision négative de la part de la population (sur les aspects concernant la sécurité, la pollution émise). Pour autant, les systèmes modulaires demandent une conception et une exploitation bien définies.

D'un point de vue global, une vision décentralisée de l'ensemble de la chaîne de transformation, suggère une structure physique et une organisation différente de l'industrie de procédés. L'agilité permettrait de reconfigurer le procédé selon les évolutions de son écosystème en s'appuyant sur des unités de transformation existantes du territoire. Ainsi, l'agilité repenserait la structure des réseaux logistiques de la transformation de la matière vers des sites décentralisés et de plus petite taille.

#### 1.3.4. Cas d'application : la transformation de la biomasse

La biomasse représente une matière dont la valorisation fait l'objet de nombreuses attentions de la part des chercheurs et des professionnels, en raison de ses caractéristiques intéressantes pour la production d'énergie décarbonée et les produits biosourcés. L'étude de cette matière présente un certain intérêt industriel compte-tenu de la diversité de ses voies de transformation et des variabilités qui les entourent.

À l'origine de bioproduits et d'énergies renouvelables au même titre que l'éolien et le solaire, la popularité de la biomasse reste néanmoins moins importante aux yeux du grand public. Elle a été définie par la (République Française, 2009) dans le Grenelle de l'Environnement comme :

*« La fraction biodégradable des produits, déchets et résidus provenant de l'agriculture, y compris les substances végétales et animales issues de la terre et de la mer, de la sylviculture et des industries connexes, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et ménagers »*

La valorisation de la biomasse fait l'objet d'une stratégie nationale (Le Déaut, 2016; République Française, 2017) dans le cadre de la Loi de Transition Énergétique et de la Croissance Verte (République Française, 2015). Les objectifs sont multiples :

- Développer les externalités positives liées à la mobilisation de la biomasse, dans le cadre des actions gouvernementales contre le changement climatique,
- Développer la valorisation de la biomasse en énergie,
- Articuler la gestion de la ressource bois en parallèle de sa mobilisation en vue de sa valorisation,
- Asseoir l'indépendance énergétique du pays grâce à des énergies décarbonées,
- Favoriser la résilience économique agricole et forestière.

En effet, le gisement de biomasse est conséquent (cinq Gtep par an après collecte) au niveau mondial (Raychaudhuri et Ghosh, 2016), ce qui ouvre des perspectives intéressantes liées à la transition énergétique. Pour autant, son caractère périssable et vivant sont des éléments déterminant pour sa valorisation. Comment l'évolution de ses propriétés altèrent le choix du procédé de transformation ?

La valorisation de la biomasse (ou le bioraffinage) est réalisée au sein de bioraffineries. D'un point de vue très général, l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA, 2018) définit la bioraffinerie comme étant « Le traitement durable de la biomasse en un spectre commercialisable de produits et d'énergie ». Une précision est apportée au niveau structurel (en introduisant la notion de réseau) et de produits par (Cherubini, 2010) comme « Une usine ou un réseau d'usines intégrant les procédés de conversion de la biomasse ainsi que le transport de biocarburants d'énergie et de produits chimiques issus de la biomasse ». La bioraffinerie repose traditionnellement sur le même système que celui de la raffinerie pétrochimique (Cardona Alzate et al., 2018; Clark et Deswarte, 2014; Fernando et al., 2006) : un système rigide et hautement spécialisé pour un procédé de transformation donné (Figure I-5).

La biomasse est diversifiée. (Hornung, 2014) identifie quatre grandes familles de biomasse impliquées chacune dans une génération de bioraffinage :

- La première génération : culture sucrière, culture amylacée, huile végétale, soja, matière grasse animale, paille, etc.,
- La deuxième génération : bois, déchets d'agriculture, déchets solides municipaux, fumier des animaux, pâte à papier, etc.,
- La troisième génération : algues, micro algues, etc.,
- La quatrième génération : céréales génétiquement modifiées.

La biomasse de première génération concurrençant l'alimentation humaine, les recherches actuelles en bioraffinage se tournent vers la valorisation de la biomasse lignocellulosique (deuxième génération) et les algues (troisième génération). Cependant, plusieurs obstacles ralentissent les projets de recherche et développement de ces modes de valorisation : les coûts d'investissement élevés, les difficultés liées à la maturité faible des procédés, les technologies coûteuses, le changement d'échelle du laboratoire à l'usine de production, la réplique sur d'autres sites, et les équipements chers (Cardona Alzate et al., 2018). À cela, il faut également ajouter que, chaque biomasse est à l'origine d'un bioproduit spécifique, impliquant un haut degré de spécialisation du procédé et de l'usine réalisant ce procédé.

Cette variété et cette diversité de voies de transformation de la biomasse associées à une variabilité intrinsèque de ses nombreuses propriétés physico-chimiques (selon l'environnement dans lequel elle se développe), en font un cas d'application intéressant d'un point de vue scientifique. Le choix de cette matière dans ces travaux de thèse est délibéré. En effet, la complexité ainsi que le nombre de paramètres et de variables à prendre en compte pour apporter de l'agilité à la transformation de la biomasse en font l'un des cas d'application les plus difficiles à appréhender. Ainsi, si la démarche développée dans ces travaux de thèse se révèle concluante, elle permettrait d'aborder d'autres cas d'application avec une certaine aisance.

Sa transformation (et plus particulièrement pour la biomasse lignocellulosique) constitue un terrain particulièrement intéressant pour la mise en œuvre de l'agilité. Elle constituera notre cas d'application qui illustrera les différentes étapes de notre démarche

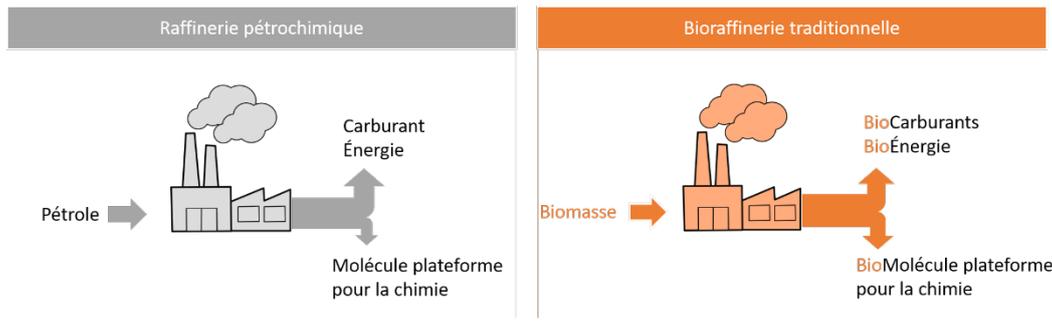


Figure I-5 : Comparaison entre les principes d'une raffinerie pétrochimique et d'une bioraffinerie selon (Kamm et al., 2016)

## I.4. Conclusion

L'industrie de procédés s'inscrit dans un contexte marqué par une instabilité et une incertitude de l'offre et de la demande sous couvert d'une forte compétition entre les industries. Au travers des avancées majeures qui ont ponctué son histoire, comme l'opération unitaire, l'industrie de procédés a su s'adapter aux différentes évolutions sociétales qui se sont succédées depuis le XVIIIème siècle. Dans cette voie, ce secteur industriel s'est principalement développé vers une production à grande échelle pour satisfaire une consommation de masse. Même si ce type de production perdurera, il y a de la place pour un autre type de production qui permettrait de répondre à des enjeux d'innovation et d'amélioration de la prise en compte du service dans l'industrie de procédés. En effet, le service constitue de plus en plus un continuum avec le produit final. Pour ce faire, un des leviers pertinents pour y répondre est l'apport d'agilité. Le positionnement de cette thèse suit les réflexions autour de l'agilité dans le domaine de l'industrie de procédés menées par des chercheurs comme Qian ou Bogle. Cette production s'orienterait vers des modèles d'affaires disruptifs qui reposent sur les technologies et les concepts de l'Industrie 4.0 vers des procédés intelligents. De plus, cette production serait à plus petite échelle et ancrée sur le territoire pour des solutions personnalisées au plus proche des besoins des clients.

Après avoir défini la problématique métier, les axes de travail pour le développement de l'agilité ont été mis en évidence. La digitalisation ouvre la voie à de nouvelles approches dans le cadre de l'Usine du Futur. La perspective de la décentralisation de l'industrie de procédés impulse de nouvelles considérations en ce qui concerne les infrastructures et les réseaux d'acteurs au-delà de la modularité, pour une approche différente de la transformation de la matière (Figure I-6).

Ces travaux de thèse visent à fournir de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière tout en prenant en compte les variabilités de l'écosystème territorial. Ce positionnement qui s'inscrit dans cette dynamique de renouveau de l'industrie de procédés, débutera avec un état de l'art afin de déterminer le cadre de notre proposition, la problématique scientifique et la démarche de recherche qui sera adoptée dans ces travaux.

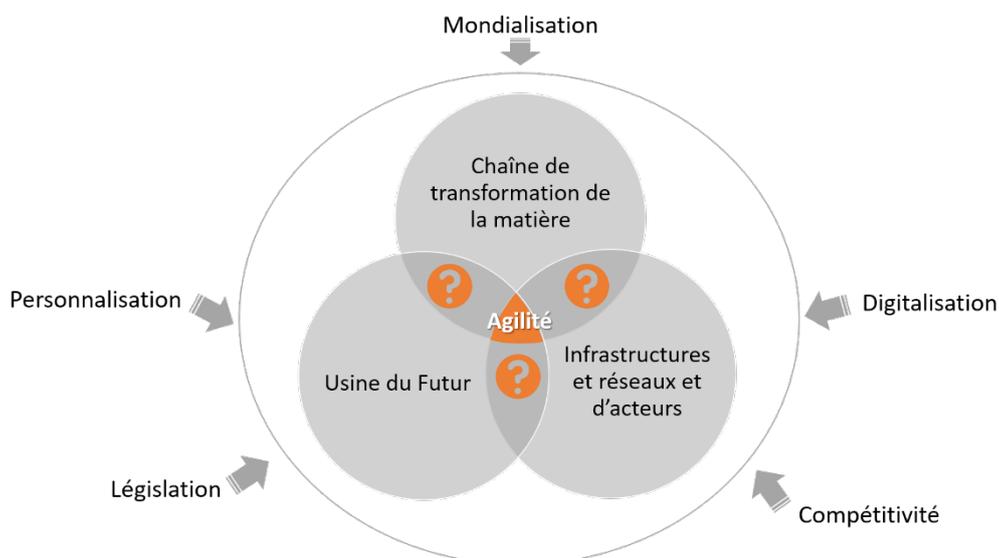


Figure I-6 : Thématiques de travail pour la mise en œuvre de l'agilité dans le Génie des Procédés, dans un environnement instable

## Chapitre II. État de l'art de l'agilité pour l'industrie de procédés

---

L'agilité des systèmes est un sujet de préoccupation majeur, appuyé par une littérature scientifique dense ces dernières années. L'objectif de ce chapitre est de détailler la problématique scientifique à la lumière de l'état de l'art.

La première partie de ce chapitre définira notre vision du concept de l'agilité pour l'industrie de procédés. Puis, la seconde partie sera consacrée à une revue de littérature concernant les méthodes et les outils existants permettant la mise en œuvre de l'agilité dans l'industrie de procédés, en s'appuyant sur l'existant en la matière dans le Génie des Procédés. Puis dans une troisième partie, les cadres de mise en œuvre de l'agilité dans le Génie Industriel seront explorés. Une quatrième partie mettra en évidence le cadre de notre proposition en détaillant les hypothèses de travail ainsi que la démarche de recherche qui sera employée dans ces travaux de thèse.

## II.1. Concept de l'agilité pour l'industrie de procédés

### II.1.1. Aperçu général de l'agilité

Comme évoqué dans le Chapitre I, l'apport d'agilité vise l'ensemble des étapes de la chaîne de transformation. Ainsi, l'objectif est ici de dresser un premier état des lieux global de la répartition de l'utilisation du terme agilité en rapport avec les processus et les systèmes, dans le paysage de l'ingénierie. Un premier niveau de recherche a consisté à extraire les articles scientifiques comprenant le terme l'agilité (et les mots de la même racine) dans les bases documentaires Science Direct et Web of Science, compte-tenu des paramètres du Tableau II-1 :

	Sciences Direct	Web Of Science
Mots clés	(agile OR agility) AND (process OR system)	agil*AND (process OR system)
Zone de recherche	Titre et/ou abstract et/ou mots-clés	
Période	1991-2020	
Nombre de réponses	1893	16833

Tableau II-1 : Paramètres de recherche de l'agilité des processus et des systèmes sur les bases documentaires Science Direct et Web Of Science

L'historique de la Figure II-1 retrace l'évolution de l'apparition de ce terme depuis 1991 :

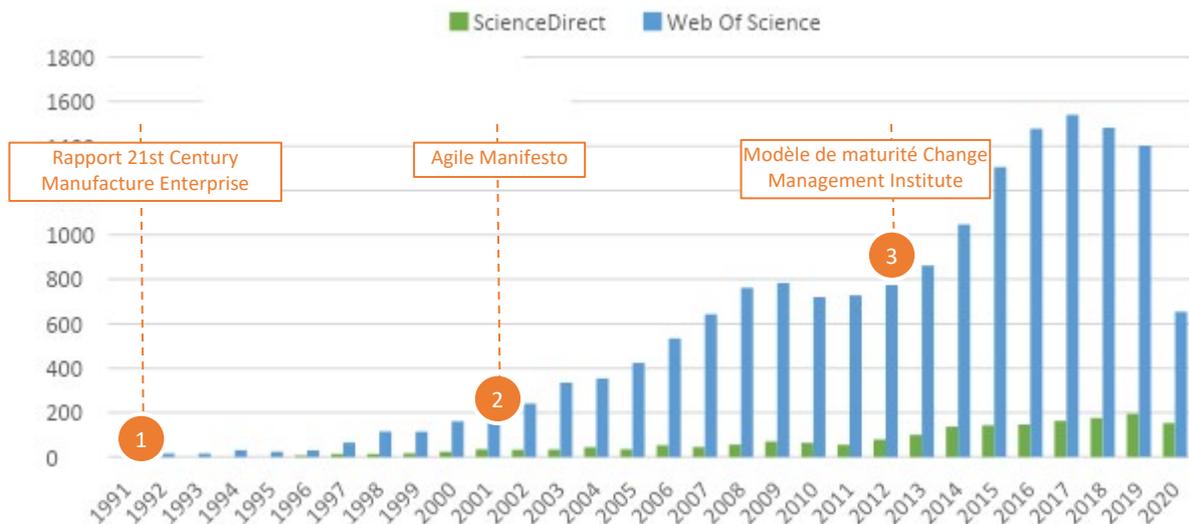


Figure II-1 : Évolution de la fréquence d'apparition du terme agilité associé aux processus et aux systèmes

En dépit du nombre sensiblement différent de publications retrouvées sur les deux bases documentaires consultées, le profil des deux courbes montre des similarités avec une tendance générale à la hausse depuis ces vingt dernières années. L'analyse s'est poursuivie par l'identification des domaines dans lesquels l'agilité des processus et des systèmes fait l'objet de recherches. Différents secteurs d'activités sont concernés avec une répartition des publications comme présenté dans la Figure II-2.

À ce stade de la recherche bibliographique, un constat peut d'ores et déjà être fait. En dépit de la présence importante du terme agilité dans le paysage de l'ingénierie, aucune définition ne faisant référence à l'agilité pour l'industrie de procédés n'a été relevée. Ce constat dressé, le champ de recherche de la section suivante se concentrera sur la définition de l'agilité dans les domaines en rapport avec ces travaux de thèse, c'est-à-dire la production industrielle et l'informatique.

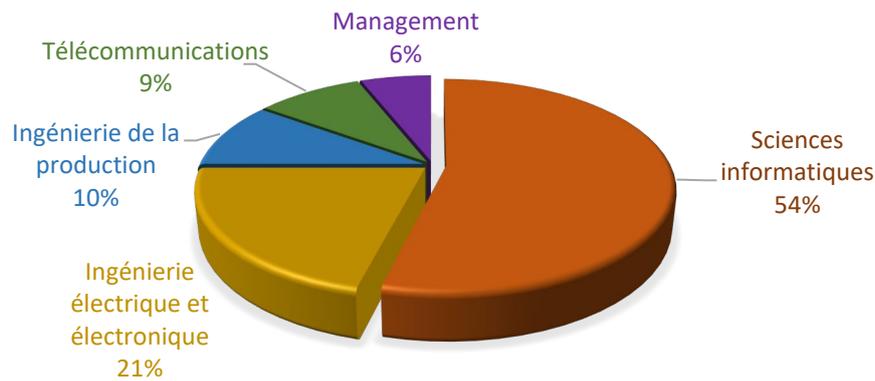


Figure II-2 : Répartition des publications traitant de l'agilité par secteur d'activité d'après une analyse effectuée avec l'outil "Results Analysis" de Web Of Science

## II.1.2. Définitions de l'agilité dans l'ingénierie de production

### II.1.2.1 Dans l'industrie manufacturière

Deuxième grande famille de l'industrie de transformation et pendant de l'industrie des procédés, la production manufacturière regroupe les activités de fabrication à l'origine de produits discrets. L'INSEE définit cette catégorie d'industries comme :

*« Une industrie de transformation des biens, c'est-à-dire principalement des industries de fabrication pour compte propre mais elles concernent aussi la réparation et l'installation d'équipements industriels ainsi que des opérations en sous-traitance pour un tiers donneur d'ordres. »*

Dans ce secteur, l'agilité a été définie en 1991 avec le rapport « 21st Century Manufacture Enterprise Strategy » (Nagel et Dove, 1991) sur demande du Congrès Américain. L'agilité a été utilisée pour faire face à un environnement concurrentiel fort vis-à-vis des entreprises japonaises, le développement de l'Internet, et une instabilité géopolitique liée, entre autres, à la chute de l'URSS et la guerre du Golfe (Gunasekaran et al., 2019). L'objectif était de renforcer la compétitivité de l'industrie américaine sur le marché mondial. Depuis, l'agilité a fait l'objet de différentes définitions contenues dans l'Annexe 2. Ces définitions de l'agilité provenant de la production manufacturière mettent en évidence le besoin de faire face à un changement continu et incertain du marché tout en apportant une réponse rapide et efficace. Autrement dit, elles soulignent un besoin d'adaptation et de réactivité.

Parmi les composantes de la production industrielles, nous privilégierons la chaîne de transformation de la matière qui est au cœur de ces travaux. À ce sujet, la logistique occupe une place importante au sein de la chaîne de transformation de la matière, de l'approvisionnement en matière première jusqu'à la livraison au client final.

Dans ce cadre, la logistique est définie par la norme (AFNOR, 2006) :

*« La planification, l'exécution et la maîtrise des mouvements et des mises en place des personnes ou des biens, et des activités de soutien liées à ces mouvements et à ces mises en place, au sein d'un système organisé pour atteindre des objectifs spécifiques ».*

De par la nervosité de la demande et du phénomène de mondialisation, l'agilité de la chaîne logistique y est, par conséquent, un enjeu majeur. Les travaux de (Marche et al., 2019) précisent que l'agilité au sein de la chaîne logistique représente la capacité d'une entreprise à répondre ou à s'adapter aux changements en modifiant l'ensemble de sa configuration (chaîne de fabrication) d'un point de vue stratégique, technologique, organisationnel ou encore humain. Les caractéristiques majeures de l'agilité dans l'industrie manufacturière et au sein des chaînes logistiques qui émanent des définitions relevées dans la littérature sont présentées dans le tableau synthétique Tableau II-2. Le détail des aspects clés des définitions sont contenues respectivement dans les Annexes 2 et 3. Les aspects clés principaux reposent sur la rapidité, la réactivité et la flexibilité tout en maintenant la croissance de l'entreprise. Le concept d'agilité de la chaîne logistique repose d'une part sur les méthodes du management des chaînes logistiques et d'autre part sur le concept de l'agilité tel que vu dans l'industrie manufacturière (Farahani et al., 2014).

	Adaptation	Croissance	Détection	Efficacité	Flexibilité	Gestion	Innovation	Partenariat	Proactivité	Production	Rapidité	Réactivité	Réseau	Stratégie	Qualité	Technologie
(Kidd, 1994)		X									X					
(Goldmann et al., 1995)		X														
(Fliedner et Vokurka, 1997)											X					
(Gunasekaran, 1999)		X		X							X	X				
(Yusuf et al., 1999)		X			X		X		X		X				X	
(Zhang et Sharifi, 2000)						X										
(H. L. Lee, 2002)					X							X		X		
(Jin-Hai et al., 2003)				X							X			X		
(Ismail et Sharifi, 2006)								X			X		X			
(Swafford et al., 2006)	X										X					
(Swafford et al., 2008)	X										X	X				
(Gligor et Holcomb, 2012)	X								X		X	X				
(Yusuf et al., 2014)					X						X					
(Sindhvani et Malhotra, 2016)							X				X					X
(Fayezi et al., 2017)			X								X					
(Dubey et al., 2018)			X		X						X					
(Marche et al., 2019)								X						X		X

Tableau II-2 : Tableau synthétique des aspects clés des définitions de l'agilité dans l'industrie manufacturière

Pour autant, l'agilité telle que définie dans l'industrie manufacturière et au sein des chaînes logistiques ne peut être transposée telle quelle au périmètre de l'industrie des procédés. En effet, ces définitions s'accordent davantage avec une production à grande échelle qu'une production pour un marché de niche. De plus, les définitions présentées dans le tableau visent des types des production de produit finis et non la chaîne de transformation de la matière. Aussi, les précédentes définitions n'intègrent pas les caractéristiques intrinsèques de la matière ou encore la réutilisation de sous-produits.

Après avoir comparé les définitions de l'agilité dans l'industrie manufacturière, la section suivante aborde les caractéristiques de l'agilité dans le développement de projets informatiques.

### II.1.2.2 Dans les projets informatiques

L'Agile Manifesto (The Agile Alliance, 2001) constitue une véritable référence de l'agilité dans le développement logiciel. Ce manifeste comprend douze principes fondamentaux mettant l'accent sur le changement, l'implication du client, la qualité du produit et la dynamique d'équipe. Le processus de

développement logiciel est alors considéré comme dynamique et évolutif (Lee et Xia, 2010). Il s'accompagne de méthodes (ou pratiques) dite agiles telles que Rapid Application Development (RAD) (Beynon-Davies et al., 1999), « La Mêlée » (SCRUM), ou Extreme Programming (XP) (Vallon et al., 2018), reprises dans le management de projet.

La transformation digitale impose une production et des outils faisant preuve d'agilité, mais également et surtout des processus menant vers l'agilité organisationnelle (Wendler, 2013). Compte tenu des difficultés liées au changement organisationnel dans les industries (VersionOne, 2010) dans les années 2000, cette tendance se développe. L'agilité est relancée au début des années 2010 avec des outils comme le modèle de maturité du Change Management Institute ou encore de Prosci (Lemieux et Beauregard, 2015) et la multiplication des recherches touchant l'ensemble de l'organisation, de la production au système informatique qui le supporte en passant par le management d'équipe et de projets (Mollahoseini Ardakani et al., 2018; Ridwandono et Subriadi, 2019; Tallon et al., 2019).

Néanmoins, le concept de l'agilité dans ce domaine fait l'objet de débats en raison d'un manque de clarté et d'un manque de conceptualisation dans le cadre des méthodes agiles (Conboy, 2009). (Kettunen, 2009) va dans ce sens en précisant qu'il n'existe pas de définition uniforme du développement logiciel agile mais fournit les caractéristiques majeures de l'agilité pour le développement logiciel qui sont la capacité de s'adapter au changement et la réactivité selon le contexte. Ce constat perdure comme expliqué dans les travaux de (Diegmann et al., 2018; Laanti et al., 2013). Ces auteurs soulignent une diversité de perception de l'agilité dans le développement de projet logiciel qui est perçue davantage comme une capacité que comme un outil de développement.

### II.1.3. Synthèse et proposition d'une définition pour l'industrie de procédés

L'étude de l'agilité pour l'industrie de procédés dans une perspective de production de niche (moins concurrentielle que la production à grande échelle) nous amène à nous intéresser à l'agilité qui s'applique à un système complexe. Différents auteurs se sont penchés sur la définition de l'agilité des processus en adoptant une approche systémique décorrélée d'une spécification métier. Nous pouvons ainsi relever les travaux de (Barthe-Delanoë et al., 2014; Bénaben et Vernadat, 2017) qui identifient quatre dimensions dans la notion d'agilité (Figure II-3) :

- La **détection** : la capacité de détecter les changements qui surviennent dans l'environnement du système et qui le rend inadéquat,
- L'**adaptation** : la capacité du système à faire évoluer son comportement afin de redevenir à nouveau adéquat à son environnement,
- La **réactivité** : la dimension temporelle, c'est-à-dire le temps nécessaire pour mettre en œuvre les capacités de détection et d'adaptation,
- L'**efficacité** : la dimension de la performance qui lie les capacités de détection et d'adaptation. La détection doit être juste. L'adaptation doit être pertinente.



Figure II-3 : Expression de l'agilité selon (Barthe-Delanoë et al., 2014) et (Bénaben et Vernadat., 2017)

Dans la suite des travaux présentés dans ce manuscrit, nous nous appuyerons sur la définition de l'agilité de (Barthe-Delanoë et al., 2014) :

*"La capacité d'un système à réaliser dans le laps de temps le plus court possible (réactivité) la détection de son inadéquation à l'environnement dans lequel il évolue et la mise en œuvre de l'adaptation nécessaire".*

Cette définition est en cohérence avec une vision système incluant le procédé et son environnement. L'agilité pourra être déployée au niveau de la phase de construction et au niveau de l'exploitation de la chaîne de transformation.

À l'issue de la section II.1, une définition a été retenue pour l'industrie de procédés. Par ailleurs, bien que s'adressant à des types de production différents, le Génie des Procédés (spécifique aux industries de procédés) et le Génie Industriel (spécifique des industries manufacturières) partagent une vision commune et complémentaire sur la notion d'analyse système (SFGP, 2017). Ainsi, La section suivante analysera les points en rapport avec l'agilité telle que nous l'avons définie pour l'industrie de procédés et l'agilité telle qu'elle est nommée et perçue dans le Génie des Procédés et le Génie Industriel.

## II.2. Analyse des concepts en rapport avec l'agilité

### II.2.1. Différentes appellations relatives au concept d'agilité

Plusieurs études font appel à des concepts ayant des appellations différentes qui se rapprochent de notre vision de l'agilité définie dans la section II.1 sans toutefois nommer le concept d'agilité. À ce constat s'ajoute le fait que le sens donné à l'agilité peut varier. La section suivante détaille la deuxième phase de la recherche bibliographique qui s'est concentrée sur la mise en évidence des termes relatifs à l'agilité.

La base documentaire Web Of Science (offrant le plus de réponses) a été interrogée avec les paramètres présentés dans le Tableau II-3. Les filtres domaine métier sont ceux proposés par Web Of Science. À noter que la catégorie « Engineering multidisciplinary » représente les domaines d'ingénierie ne pouvant pas être classés que dans un seul type d'ingénierie. Ce filtre a été intégré afin d'être le plus couvrant possible.

	Web Of Science
Mots clés	agil*AND (process OR system)
Nombre de réponses	16833
Période	1991-2000
Filtre domaine métier	Engineering manufacturing Industrial Engineering Engineering multidisciplinary
Nombre de réponses après filtre	1874

Tableau II-3 : Paramètres de recherches pour l'affinage de la recherche bibliographique sur la base documentaire Web Of Science

Les titres, les mots-clés signalés par les auteurs et les résumés ont été traités par le logiciel VOS Viewer selon une analyse par cooccurrence. Parmi les 972 mots ou groupes de mots qui en sont ressortis, un tri manuel sur 80% des éléments les plus pertinents a été effectué pour ne conserver que les mots ou groupes de mots représentant des clusters pertinents. Les critères de choix se sont portés sur les groupes de mots contenant les termes « agile » ou « agility » ainsi que les mots pouvant avoir une similarité sémantique avec l'agilité selon les dimensions de la définition proposée dans la section II.1.3. À partir du réseau de termes pertinents par cooccurrence, le graphe résultant est présenté sur la Figure II-4. Un nœud représente un concept. La taille d'un nœud est déterminée selon l'occurrence du

concept. Un arc relie deux concepts à chaque fois que les deux concepts ont été retrouvés en cooccurrence. L'épaisseur de l'arc est proportionnelle à la cooccurrence.

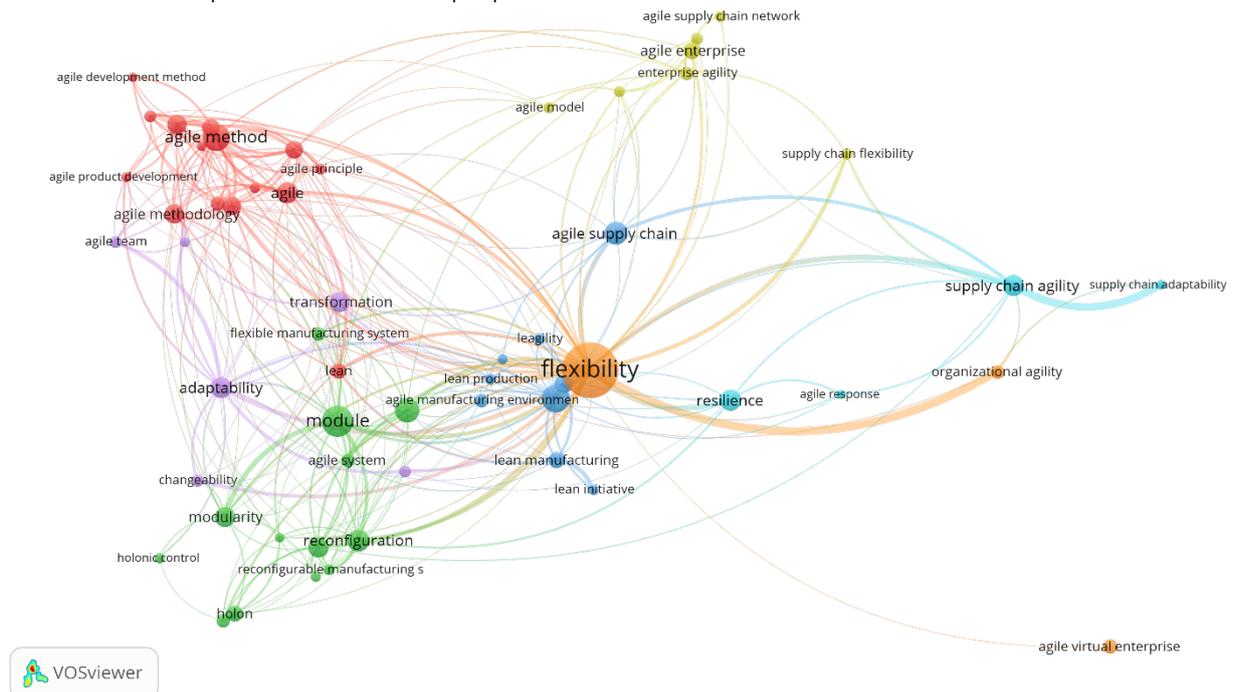


Figure II-4 : Mots ou groupes de mot apparentés à l'agilité avec le logiciel VOSviewer

En dehors des groupes de mots contenant le terme agilité et agile, les termes suivants s'apparentant à l'agilité ou ayant un sens pouvant être similaire se distinguent : adaptabilité, changeabilité (dans le sens de modifiable), flexibilité, holonique, leagile, lean, modularité, reconfigurabilité (dans le sens de reconfigurable), réactivité, résilience, et transformable. Derrière ces termes, trois regroupements principaux se dégagent.

Le premier est autour de la flexibilité, de la réactivité et du lean. Les systèmes flexibles dans le domaine de la production manufacturière ont fait l'objet de nombreuses publications, projets scientifiques et industriels depuis les années 1980 (Catalán et al., 2011). Certains auteurs comme (Santos Bernardes et Hanna, 2009; Schmidt et al., 2016; Wadhwa et Rao, 2003) les présentent comme les précurseurs des systèmes agiles. Des auteurs comme (Barata et al., 2007; Barata et Camarinha-Matos, 2003; Schuh et al., 2007) ont eu un impact fort sur la conceptualisation de systèmes pour une production flexible, en effectuant une première distinction entre les aspects propres à l'efficacité du type de production et les aspects liés à l'organisation de la production. (Gunasekaran, 1999), un des pionniers de l'agilité de la production, estime que l'agilité est un concept fondé prioritairement sur des besoins de flexibilité et de réactivité, en intégrant une certaine efficacité financière. Ce dernier est à l'origine du concept de chaîne logistique réactive (Gunasekaran et al., 2008). Il place l'agilité dans la succession du lean, qui s'applique lorsque la demande est stable et prévisible et nécessite peu de personnalisation. Le concept du lean est fondé sur l'élimination des gaspillages (Womack et Jones, 1997). Pour une mise en œuvre jugée plus efficace (Gunasekaran, 1999) associe les principes du lean et de l'agilité. Dans cette dynamique, ils sont suivis par des auteurs comme (Vinodh et al., 2009, 2010) ou encore (Sindhvani et al., 2020; Sindhvani et Malhotra, 2015, 2016) qui placent l'agilité à l'intersection entre la production lean et la production flexible.. Par ailleurs, le paradigme du leagilité (Ben Naylor et al., 1999; Mason-Jones et al., 2000), couple les approches lean et agile. Il se spécifie en déterminant un équilibre entre une demande instable et une planification pertinente.

Le second cluster concerne une ramification de la flexibilité principalement tournée vers les architectures d'entreprises, les systèmes d'information et les méthodes agiles. Elles sont employées notamment pour soutenir une production et des projets pouvant faire face à de fortes variabilités. L'étude de la flexibilité dans ce secteur d'activité est portée essentiellement par les travaux de (Chan et al., 2017; Chan, 2001, 2002) ou encore (Rumpl et al., 2002; Zoitl et al., 2013).

Le troisième cluster concerne la modularité (Harrison et al., 2006), l'adaptabilité (Gunasekaran, 1997), la reconfigurabilité (Harrison et al., 2006; Koren, 2005), la transformabilité (Wiendahl et Hernández, 2006), la changeabilité (G. Schuh et al., 2009) et l'holonisme (Borangiu, 2009; Borangiu, et al., 2009; Borangiu et al., 2009). Ces concepts ont pour point commun de jouer sur la configuration du système en proposant des agencements permettant son évolution d'un point de vue temporel mais également spatial. Sur ce point, le type d'élément qui permet de reconfigurer le système est regroupé sous le terme de module, dont la définition et les caractéristiques sont définies par (Allen et Carlson-Skalak, 1998) comme y sont primordiales :

*« Un composant ou un groupe de composants qui peuvent être retirés du produit en tant qu'unités, sans le détruire et qui fournit une fonction de base unique nécessaire pour que le produit fonctionne comme souhaité »*

Le module à l'avantage de ne pas être modifiable, d'être indépendant du projet et réutilisable, ce qui le rend particulièrement intéressant d'un point de vue financier, énergétique et environnemental (Eilermann et al., 2018).

Enfin, il ne s'agit pas d'un cluster mais plutôt d'une tendance qui s'amplifie : la résilience de la production. Elle se manifeste par un aspect collaboratif autour d'organisations virtuelles. Ce concept est soutenu par des auteurs comme Kaihara (Kaihara et al., 2017; Kaihara et Fujii, 2002) ou Camarinha-Matos (Camarinha-Matos et al., 2000; Camarinha-Matos, 2014).

Par la suite, nous concentrerons notre analyse sur les concepts de flexibilité et de modularité. En effet, ces concepts sont plus ancrés dans le Génie des Procédés. Les études concernant la modularité et la flexibilité font l'objet de travaux depuis les années 80, de l'échelle du procédé jusqu'à l'échelle de l'industrie (Dieterich et Eigenberger, 1997; Hoch et Eliceche, 1996; Hohmann et al., 2017).

### II.2.2. Comparaison avec notre définition de l'agilité

Parmi l'ensemble des concepts en rapport avec l'agilité, nous nous concentrerons sur les deux concepts les plus répandus : la flexibilité et la modularité. Chaque dimension de notre vision de l'agilité (détection, adaptation, réactivité, efficacité) sera comparée avec les aspects clés des définitions issues de la littérature de ces deux concepts. Le but est d'évaluer le niveau de couverture des définitions de la flexibilité et de la modularité vis-à-vis de la définition que nous avons choisie pour l'industrie des procédés. Les concepts identifiés par les acronymes : FLEX : Flexibilité –MODU : Modularité sont présentés dans le Tableau II-4.

Bien que proches de notre définition de l'agilité, aucun de ces concepts ne couvre les quatre dimensions de notre vision. Bien que l'adaptation, la réactivité et l'efficacité soient partagées pour faire face aux changements, détecter ces derniers restent un aspect peu traité. Cela peut s'expliquer par le fait que la production s'établit sur des cycles de plus en plus courts.

Pour ces raisons, l'agilité telle que nous la percevons combine l'ensemble des dimensions traitées partiellement par ses concepts voisins. Même s'il n'existe pas de définitions équivalentes à celle choisie pour l'industrie de procédés en termes de couverture des quatre dimensions (détection, adaptation, réactivité, efficacité), il reste néanmoins possible de s'inspirer voire de s'appuyer sur les

méthodes et les outils existants de l'agilité dans le Génie des Procédés, en ciblant les concepts de la modularité et de la flexibilité.

Concept	Auteur, Date	Définition	Dimensions de l'agilité			
			Détection	Adaptation	Réactivité	Efficacité
FLEX	(Barata et Camarinha-Matos, 2003)	"Flexibility [...] means that a company <i>can easily adapt itself</i> to produce a range of products."		x		
	(Chan, 2001)	"The ability to <i>handle breakdowns</i> and to <i>continue producing</i> the given set of part types."		x		x
	(Schuh et al., 2019)	"Product flexibility refers to the <i>suitability</i> of the process regarding different [...] thickness and size and low-cost production of variable annual quantities."		x		
MODU	(Harrison et al., 2006)	"Modularity makes systems easier to build, reconfigure, and repair. It also makes systems intellectually more <i>manageable</i> , i.e., reduces the skill level needed to support a given system throughout its lifecycle."		x	x	x
	(Hohmann et al., 2017)	"Modularization refers to a procedure, where a complex setup is defined by modules. A 'module' is regarded as an unmodifiable element during planning and realization of assemblies with modules. An assembly consisting of two or more modules is then regarded as 'modular'. A module represents or provides a dedicated function for the process and is reusable during planning or realization of modular plants in the process industry."		x	x	x

Tableau II-4 : Évaluation des concepts similaires à l'agilité par rapport à notre vision de l'agilité

### II.3. Cadre méthodologique existant de l'agilité dans le Génie des Procédés

Dans cette section, une revue de littérature complète a été réalisée sur les différents concepts relatifs à l'agilité. L'analyse complète se trouve dans l'Annexe 4. Toutefois, dans la continuité du paragraphe II.2.2, nous nous concentrerons sur l'analyse des concepts de flexibilité et de modularité.

#### II.3.1. Méthodes et outils existants relatifs à la flexibilité

Le Tableau II-5 présente les moyens méthodologiques et les outils de mise en œuvre en termes de flexibilité dans le Génie des Procédés.

Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Dimensions de l'agilité			
			Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
(Ajah et al., 2005)	Flexibilité des usines de procédés <i>Conception</i> <i>Modélisation</i> <i>Optimisation</i>	Définition des exigences Modélisation Conception Mesure des performances		x	x	

Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Dimensions de l'agilité			
			Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
(Quaglia et al., 2012)	Cadre d'aide à la décision pour la gestion des usines et le développement de nouveaux procédés  <i>Optimisation</i>	Définition du problème Collecte des données et définition de la superstructure Sélection, développement et validation des modèles Modèle Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) Optimisation de l'alternative sélectionnée	x	x	x	
(Anantpinijwatna et al., 2016)	Conception et analyse de systèmes de réaction catalytique selon les conditions de réaction, de pression, de température et selon différents solvants  <i>Modélisation</i>	Modèles thermodynamiques prédictifs et corrélatifs		x		
(Ng et Martinez Hernandez, 2016)	Réalisation de systèmes poly générationnels dans une approche développement durable  <i>Conception</i> <i>Modélisation</i>	Définition du problème Modélisation mathématique Analyse des limites extérieures Analyse des limites intérieures		x	x	
(Heitmann et al., 2017)	Planification et gestion des investissements de la production selon la fluctuation des marchés  <i>Conception</i>	Modélisation du marché instable Création de centrales de références et de centrales flexibles Planification de la production Évaluation économique et du risque Évaluation de l'investissement	x	x	x	
(Y. Chen et al., 2018)	Garantir la flexibilité et la stabilité des étapes du procédé  <i>Optimisation</i>	Théorie de la singularité (Analyse de la flexibilité intégrant la stabilité)		x	x	
(Di Pretoro et al., 2019)	Méthode d'analyse pour évaluer le niveau de flexibilité d'un équipement  <i>Optimisation</i>	Analyse de la flexibilité		x	x	

Tableau II-5 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de la flexibilité en Génie des procédés

La gestion des incertitudes concernant un paramètre de la réaction (propriétés de la matière première, la cinétique de la réaction ou encore les coefficients de transfert (Halemane et Grossmann, 1983)), un équipement ou encore la disponibilité de la matière est un des axes principaux de l'agilité en Génie des Procédés. Elle se manifeste notamment par une maîtrise des performances, où la flexibilité est un indicateur majeur. Elle correspond à la capacité de la chaîne de transformation à s'adapter à un

ensemble de paramètres incertains (Hoch et Eliceche, 1996) . Les travaux présentés dans le Tableau II-5 font état du concept de la flexibilité en fonction de différentes échelles :

- À l'échelle réactionnelle, les paramètres peuvent être adaptés à des conditions spécifiques pour une opération unitaire donnée, grâce à des cadres de modélisation thermodynamiques théoriques et corrélatifs. C'est le cas des travaux de (Anantpinijwatna et al., 2016) pour des systèmes de catalyse.
- À l'échelle de l'équipement, pour évaluer les gammes de conditions de fonctionnement performantes, (Di Pretoro et al., 2019) ont étudié différentes analyses de la flexibilité. Combinées, ces analyses permettent de déterminer et d'évaluer les zones de performances maximale et minimale d'un équipement.
- (Ajah et al., 2005) présentent une taxonomie de la flexibilité dédiée aux usines dans les domaines énergétiques, de la gestion de l'eau et des déchets associée à un cadre d'intégration en trois grandes phases : i) identification des exigences fonctionnelles de conception, ii) analyse, synthèse et optimisation des variables de contrôle et de conception, iii) évaluation des performances techniques, sociales et économiques obtenues par rapport à celles préalablement définies. (Heitmann et al., 2017) ont travaillé sur un cadre permettant d'apporter de la flexibilité à la planification de la production d'une usine, dans ses premières étapes de conception.

En dépit du nombre d'études concernant la flexibilité dans le Génie des Procédés, peu de publications utilisent les quatre dimensions de notre vision de l'agilité dans leur intégralité.

### II.3.2. Méthodes et outils existants relatifs à la modularité

Le Tableau II-6 présente les moyens méthodologiques et les outils de mise en œuvre en termes de modularité dans le Génie des Procédés.

Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Dimensions de l'agilité			
			Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
(Ranade et al., 2015)	Réalisation d'équipements modulaires <i>Conception</i>	Méthodologie MAGIC (Modular, AGile, Intensified and Continuous)		x	x	x
(W. Wu et al., 2016)	Modélisation et création de superstructures pour la synthèse de procédés <i>Modélisation Conception</i>	Approche modulaire		x	x	x
(Lier et al., 2017)	Développement des appareils modulaires <i>Conception</i>	Mise à l'échelle innovante		x	x	
(Eilermann et al., 2017)	Création d'une base de données de modules pour un équipement <i>Conception</i>	Fiche de données processus Analyse des clusters Conception de l'équipement de référence Analyse de la demande Base de données de l'équipement		x	x	x

Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Dimensions de l'agilité			
			Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
(Gerbaud et al., 2020)	Développement de procédés et d'usines inspirés par la nature  Modélisation	Thermodynamique hors équilibre Loi de la construction Concept de contrôle non linéaire		x	x	

Tableau II-6 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de la modularité en Génie des procédés

Une possibilité de pouvoir réagir aux incertitudes en réduisant les délais avec efficacité consiste à envisager la chaîne de transformation comme un système composé de modules réutilisables.

Dans ces conditions, l'usine modulaire a pour principal objectif de simplifier la construction d'usines à partir de modules réutilisables pour diminuer les coûts et la durée de construction (Hohmann et al., 2017) où chaque module peut être assimilé à une opération unitaire ayant une fonction déterminée.

Dans ce sens, la modularité représente une opportunité supplémentaire d'économie et d'accroissement de la capacité de production lorsqu'elle est couplée à l'intensification de chaque module (Baldea et al., 2017). À ce sujet, (Ranade et al., 2015) ont déterminé une méthode de production intitulée MAGIC (Modular, Agile, Intensified & Continuous) autour de l'intensification des procédés et de la modularité. Cette méthode repose sur une analyse réactionnelle pour améliorer les performances au sein d'équipements comme les colonnes à distiller, par exemple.

Par ailleurs, la modularité associée à la décentralisation présente des avantages en termes de distribution des unités de production et de limitation des ressources et de l'énergie (Lier et al., 2017). L'étape de conception du module est primordiale. Pour autant, il semble opportun de disposer d'une base de données de modules d'équipements pour en accélérer leur conception. (Eilermann et al., 2017) ont élaboré une méthodologie dans ce sens. À ce sujet, certains auteurs comme (Lier et al., 2017; Stec et al., 2003) signalent que la standardisation des modules serait un plus pour faciliter la réorganisation et l'interopérabilité du système de production. Toutefois, la standardisation n'est en aucun cas une condition sine qua non, mais une hypothèse de travail servant à la construction spécifique de modules.

De manière analogue par rapport aux études concernant la flexibilité, les recherches concernant la modularité dans le Génie des Procédés ne portent pas sur les quatre dimensions de notre vision de l'agilité.

### II.3.3. Enseignements de la revue de littérature dans le Génie des Procédés

L'agilité s'applique à différentes échelles de la chaîne de transformation allant de la réaction jusqu'à l'usine de production. Toutefois, les démarches existantes tendent principalement vers l'optimisation des opérations unitaires et des équipements (en termes d'efficacité, de disponibilité et fonctionnalités) pour la sélection et/ou la conception du procédé le plus optimal en fonction du marché et des investissements. En effet, tout au long du cycle de vie d'un procédé, les coûts opérationnels, d'investissement et de développement sont onéreux. C'est pourquoi tendre vers un procédé optimal (d'un point de vue chimique, opérationnel, économique) se révèle être un objectif partagé par plusieurs auteurs. Différentes méthodes d'optimisation sont mises à l'œuvre pour aider à la sélection de l'option

---

la plus favorable selon les conditions données : régression linéaire (Bhadriraju et al., 2019; Sung et al., 1998), analyse multicritères (Leong et al., 2019; Ng et Martinez Hernandez, 2016), modèles et algorithmes mathématiques (Shi et You, 2016; Steimel et Engell, 2015).

Or, l'agilité induit une prise en compte de l'ensemble de la chaîne de transformation comprenant le procédé, l'infrastructure qui le supporte et son environnement.

La modularité constituerait alors un support intéressant. En effet, la modularisation des opérations unitaires, pratique ancrée dans ce secteur d'activité (Dieterich et Eigenberger, 1997), rencontre un regain d'intérêt depuis cette dernière décennie (Eilermann et al., 2017) en raison des avancées technologiques ouvrant le champ des possibles. À ce titre, le projet européen F3 Factory (Flexible, Fast and Future production processes) (Bieringer et al., 2013) a marqué un tournant dans l'implantation de la modularité dans l'industrie de procédés tant par ses objectifs que par son envergure. L'objectif affiché était de démontrer la faisabilité d'une usine modulaire pour une production à petite ou moyenne échelle. Ce projet s'est démarqué par des démonstrateurs réalistes (à une échelle de production réelle). Ce projet a démontré, entre autres, que la modularité accélère le développement de nouveaux produits dans une optique de limitation de la consommation d'énergie et d'émissions. Selon (P. Gupta, 2018), la modularité constitue un aspect essentiel de Usine du Futur, tout secteur d'activité confondu. Néanmoins, dans le Génie des Procédés, la modularité se heurte à des difficultés concernant les interactions dynamiques (flux de matières, d'énergie et d'informations) à assurer entre les différents modules et du contexte propre à chaque chaîne de transformation. Or, l'un des défis de la modularité est d'assurer l'interopérabilité entre les modules.

Ces travaux de thèse s'inscrivent dans une volonté qui s'étend au-delà de la modularisation. En effet, la prise en compte de l'écosystème du procédé dans la constitution et l'assemblage des différentes étapes de transformation est fondamentale dans notre vision de l'agilité. La vision système traite de la globalité du système de production.

Cet aperçu de la littérature souligne que parmi les cadres méthodologiques présentés précédemment, aucun n'est couvrant sur toutes les dimensions de notre définition de l'agilité pour la chaîne de la transformation de la matière. Pour autant, il se dégage des axes d'étude qui se rapprochent de ceux employés dans l'industrie manufacturière. Compte tenu de la complémentarité entre le Génie Industriel et le Génie des Procédés sur la vision système, il est intéressant d'explorer les recherches et les résultats sur l'agilité dans le Génie Industriel.

#### **II.4. Méthodes et outils existants de l'agilité dans le Génie Industriel**

Les travaux de cette thèse placent l'agilité dans un cadre de production défini : un segment restreint proposant une offre changeante et répondant à une demande spécifique. Les caractéristiques de l'agilité dans la production manufacturière reposent sur un environnement dynamique, incertain et changeant ainsi que sur la capacité de réponse de la chaîne de production. L'environnement du système de production devient un élément essentiel à considérer dans la mise en œuvre de l'agilité (Soepardi et al., 2018). Cette similitude nous oriente vers l'exploration des méthodes et des outils de l'agilité dans l'industrie manufacturière.

## II.4.1. Méthodes et outils existants dans le secteur de la production manufacturière

Les méthodes et outils pertinents ont été synthétisés dans le Tableau II-7.

Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthode et/ou Outils	Périmètre d'application (détails)	Dimensions de l'agilité			
				Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
(Catalán et al., 2011)	Gestion de logiciel des systèmes de production agile <i>Conception</i>	Plateforme COSME	Machine		x	x	
(Jacobs et al., 2011)	Réalisation de systèmes de production modulaires <i>Conception théorique</i>	Modèle mathématique	Production		x	x	
(Yang et al., 2016)	Automatisation des opérations de production selon la taille des pièces à produire <i>Conception</i>	REMORA : Robots qui ont la capacité de se déplacer et d'effectuer des opérations simultanément	Atelier		x	x	
(Ding, 2018)	Adaptation des concepts et les technologies de l'Industrie 4.0 au domaine de la pharmacie <i>Conception</i>	Technologies Industrie 4.0	Atelier		x	x	x
(Bortolini et al., 2018)	Amélioration de la gestion des flux de pièces et d'installations de modules grâce à des systèmes de production reconfigurables cellulaires <i>Modélisation</i> <i>Optimisation</i>	Modèle d'optimisation par programmation linéaire	Machine		x	x	x
(Tan et al., 2019)	Amélioration de la productivité grâce à un système de production en réseau <i>Modélisation</i> <i>Conception</i>	Modèle du monde réel (SWorld Model) Algorithme de projection du vecteur d'entropie	Production		x	x	

Tableau II-7 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de l'agilité dans la production manufacturière

Un moyen de fournir de l'agilité à la production est d'agir sur les équipements et le réseau informatique qui les supportent. Cela peut passer par la communication entre les machines-outils au travers leurs applications, via la conception et la réalisation de systèmes distribués (Catalán et al., 2011).

La plateforme COSME s'appuie sur : un logiciel de contrôle reconfigurable, une architecture permettant le contrôle de système distribué, des logiciels en « open access » et normés facilitant leur interopérabilité tout en évitant des développements logiciels longs. (Tan et al., 2019) visent à résoudre des problèmes de performances en temps réel, d'autoadaptation et de coordination dynamique des systèmes de production en réseau. L'agilité peut être aussi apportée par la création de robots aux

---

capacités multiples combinées (déplacement, préhension, alerte) qui s'adaptent à l'espace de travail mais aussi aux tâches à réaliser (Yang et al., 2016).

(Jacobs et al., 2011) ont élaboré une théorie générale des systèmes modulaires. Empirique, elle questionne sur les liens entre un système modulaire, via ses modules, la fabrication de produits, les processus commerciaux de l'entreprise et le pilotage des performances du système. À ce titre, (Gershenson et al., 2003) précisent que le recyclage, la réutilisation et l'élimination des modules sont facilités. Cette étude établit que la modularité facilite l'agilité de la fabrication de produits manufacturés tout en améliorant les performances de l'entreprise en termes d'investissements et de parts de marché. Ils préconisent que la modularité soit intégrée au plus tôt dans la conception du produit

En restant dans une vision modulaire et reconfigurable, les travaux (Bortolini et al., 2019) ont mené à la conception de systèmes de production cellulaires reconfigurables, prenant en compte les modules auxiliaires (habituellement écartés des modèles d'optimisation). L'environnement de production est constitué de plusieurs cellules équipées de machines-outils reconfigurables. Celles-ci sont composées de modules de base structurels et de modules auxiliaires personnalisés pouvant être déplacés sur la chaîne selon les besoins. La démarche des auteurs combine l'acheminement des pièces et l'attribution des modules auxiliaires en équilibrant au mieux les flux de pièces entre les machines-outils et l'effort d'installation des modules auxiliaires sur les machines. Cette démarche est soutenue par un modèle d'optimisation qui minimise le temps de déplacement des pièces entre les cellules, le temps d'installation pour assembler les pièces ainsi que le temps de montage et de démontage des modules auxiliaires. Elle permet de gagner du temps pour les demandes très changeantes et personnalisées. En contrepartie, elle requiert un investissement matériel non négligeable.

Afin de mettre en œuvre une production plus agile plus durable et robuste (Ding, 2018) a développé le concept d'Industrie pharmaceutique 4.0. Il s'appuie sur les concepts et les technologies de l'Industrie 4.0 (Internet des Objets, Systèmes Cyber Physiques) pour augmenter la productivité, renforcer l'aide à la décision, améliorer la communication et la coordination de la production. Concrètement, ces technologies sont employées pour améliorer le flux d'informations et le pilotage du processus de fabrication et permettre la personnalisation de la demande, tout en réduisant la production de déchets et la consommation énergétique de l'usine. Ces travaux mettent en évidence le besoin de proximité de la chaîne logistique pharmaceutique, mais également de compréhension du changement quant aux besoins personnalisés des clients finaux comme les établissements de soins. Selon (Ding, 2018), ce besoin est d'autant plus nécessaire que la production telle que réalisée actuellement continue de générer du surplus de production du fait d'un appareil productif pouvant gagner en réactivité et en performance.

Les méthodes et les outils présentés dans le tableau II.6 s'appuient majoritairement sur des méthodes d'optimisation pour adapter au mieux la production de manière efficace. Aussi, l'agilité du système de production impacte indéniablement la chaîne logistique dans laquelle il s'inscrit. La section suivante présente les moyens d'implémentation de l'agilité à cette échelle.

#### **II.4.2. Méthodes et outils existants à l'échelle de la chaîne logistique**

D'abord définie pour répondre à un changement ponctuel (Lee, 2002), l'agilité au sein des chaînes logistiques a évolué pour répondre à une instabilité permanente (Swafford et al., 2006) source d'incertitudes (Costantino et al., 2012). Cette évolution de la prise en compte de la source de changement s'accompagne d'une évolution du périmètre de mise en œuvre passant de la chaîne logistique et ses partenaires (Christopher, 2000) à l'ensemble de son environnement et du marché (Dubey et al., 2018). Cette dernière a été amplifiée par l'évolution des technologies de l'Industrie 4.0 (Gupta et al., 2019).

Les méthodes et outils pertinents ont été synthétisés dans le Tableau II-8.

Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthode et/ou Outils	Périmètre d'application	Dimensions de l'agilité			
				Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
(Christopher et Towill, 2001)	Développer des chaînes logistiques rentables <i>Conception</i>	Méthodologie hybride qui repose sur les principes du lean et de l'agilité	Chaîne logistique générique				x
(Agarwal et al., 2007)	Élaborer des stratégies pour apporter de l'agilité à la chaîne logistique <i>Modélisation</i>	Matrice d'interaction entre les variables de l'agilité	Chaîne logistique générique		x	x	
(Balaji et al., 2014)	Améliorer les pratiques et limiter les risques d'échecs <i>Conception</i>	Agile Supply Chain Transformation Matrix (ASCTM)	Chaîne logistique PME		x	x	
(Mehralian et al., 2015)	Apporter de l'agilité lors de la fourniture, la production et la distribution de médicaments <i>Modélisation</i>	Supply Chain Operations Reference (SCOR) model Multiple Attribute Decision-Making (MADM) algorithm Fuzzy TOPSIS	Chaîne logistique Pharmacie		x	x	x
(Jiang et al., 2017)	Élaborer une plateforme de gestion et de planification collaborative entre les partenaires de la chaîne logistique <i>Modélisation</i> <i>Conception</i>	Matrix of Plan Representation	Chaîne logistique PME	x	x	x	x
(Sharma et al., 2017)	Élaborer des stratégies de mise en œuvre de l'agilité <i>Conception</i>	Modèle unifié de l'agilité pour les chaînes logistiques	Chaîne logistique générique		x	x	
(Marche et al., 2019)	Associer le processus d'innovation de la conception d'un produit et faire évoluer la chaîne logistique <i>Modélisation</i>	Décomposition du produit Traduction des exigences du produit dans le processus de fabrication Modélisation de la chaîne logistique à l'état initial et à l'état futur (SysML) Comparaison des chaînes logistiques et transformation du processus	Chaîne logistique générique		x	x	x

Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthode et/ou Outils	Périmètre d'application	Dimensions de l'agilité			
				Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
(Gyarmathy et al., 2020)	Renforcer l'agilité de la chaîne logistique à l'étranger  <i>Modélisation</i>	Modèle théorique pour pérenniser la compétitivité	Chaîne logistique générique		x		

Tableau II-8 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de l'agilité dans les chaînes logistiques

D'un point de vue général, (Christopher et Towill, 2001) ont développé une approche en trois niveaux interdépendants. Le premier niveau intègre les principes fondamentaux pour atteindre l'agilité (la reconfiguration rapide et la capacité de reporter/décaler la production). Le second niveau identifie les programmes indispensables à la réalisation des aspects de premier niveau c'est-à-dire les concepts comme la rapidité et la flexibilité de la réponse, une production de type Lean où les gaspillages sont limités. Le troisième niveau détaille les actions à déployer pour mettre en application les concepts (la standardisation pour le Lean, la réduction de la durée des délais pour la rapidité des réponses). Cette approche n'a pas vocation à être utilisée de manière opérationnelle, mais plutôt à fournir aux managers de la chaîne logistique une vision étendue des éléments de l'environnement (internes et externes) qui facilitent la mise en place de l'agilité. Un accent est mis sur le fait que les mesures prises pour la mise en œuvre de l'agilité sont dépendantes du contexte.

La matrice de transformation développée par (Balaji et al., 2014) a pour objectif d'aider les Petites et Moyennes Entreprises (PME) à l'identification des moyens pour améliorer le niveau d'agilité de leurs chaînes logistiques. Elle prend en compte d'une part la dynamique de l'écosystème de la chaîne logistique et d'autre part les capacités existantes de l'entreprise, selon trois étapes : (i) identifier les objectifs de l'entreprise et les changements opérationnels qu'ils induisent, (ii) calculer le poids de chaque objectif grâce à une Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) (iii) classer et hiérarchiser les objectifs avec un outil qualité. À l'issue de cette démarche, un outil d'aide à la décision multicritères sous forme de matrice est obtenu. Face aux difficultés de mise en œuvre de l'agilité dans les petites structures, cette matrice de décision permet de faciliter et d'anticiper les changements d'infrastructures et d'équipements nécessaires.

Les travaux de (Gyarmathy et al., 2020) se sont penchés sur les impacts de la distance entre le lieu de production et les consommateurs finaux sur l'agilité de la chaîne logistique. Les précédentes études sur cette question indiquent que les entreprises qui cherchent à optimiser leurs opportunités par le biais de l'approvisionnement mondial ne sont pas toujours viables. Ainsi, un résultat de ces travaux montre que, pour maintenir l'agilité d'une chaîne logistique, il est essentiel que l'approvisionnement local soit privilégié. Il permet notamment une vision économique claire et l'évitement de nombreux coûts inattendus, cachés et dynamiques liés à l'import de matière. La revue de littérature de (Sharma et al., 2017) au sujet de l'agilité des chaînes logistiques a abouti à la création d'un cadre générique autour de trois axes pour implémenter les chaînes logistiques agiles :

- La stratégie d'entreprise, influencée par le marché et les orientations de l'entreprise,
- Les capacités opérationnelles de l'entreprise pour intégrer l'agilité dans la chaîne logistique en s'appuyant sur la collaboration, la sensibilité au marché, la gestion des risques au niveau de la chaîne logistique ou encore la digitalisation,
- La performance.

Ce cadre permet d'avoir une vision globale des axes à déployer pour implémenter l'agilité au sein des chaînes logistiques, sans établir de liens entre chacun de ses axes.

Ce lien a été étudié dans les travaux de (Agarwal et al., 2007), lors de sessions de réflexion collective associant industriels et experts au cours desquelles quinze variables facilitant la mise en œuvre de l'agilité ont été identifiées. Ces travaux se sont concentrés sur la manière de les articuler ensemble afin d'élaborer des stratégies de production. Ces caractéristiques ont été discutées et déterminées en amont par un groupe d'experts. Une démarche similaire a été également suivie par (Mehralian et al., 2015) dans le secteur pharmaceutique.

Les travaux de (Marche et al., 2019) ont étudié l'influence des logiques décisionnelles, organisationnelles et liées au processus lors de la reconfiguration de la chaîne logistique suite à une innovation produit. Ces travaux ont utilisé le concept de l'agilité pour analyser les impacts de la conception d'un produit sur la chaîne logistique d'un point de statique (caractère agile de la chaîne logistique à un instant  $t$  de la reconfiguration) mais également d'un point de vue dynamique (agilité utilisée pour décrire l'évolution de la chaîne logistique pour supporter l'innovation et les incertitudes). Cette approche vient valider le fait que l'agilité contribue à la reconfiguration de la chaîne logistique, dans un contexte d'innovation

Les travaux de (Jiang et al., 2017) proposent une approche couvrant l'ensemble de notre vision de l'agilité (dans le cadre du projet européen C2NET - Cloud Collaborative Manufacturing Networks). Ils concernent la gestion d'une chaîne logistique collaborative à travers une plateforme cloud. Cette dernière est en charge de la gestion des données, de la planification de la production tout au long du cycle de vie de la collaboration en s'appuyant sur un service de modélisation des données collectées, d'un service de détection et d'adaptation des écarts liés à la date de commande et à la quantité produite ainsi qu'un service d'évaluation de la production. L'agilité est apportée par une matrice (Matrix of Plan Representation) constituée d'outils de planification et d'ordonnancement à destination du produit mais également de l'équipement (planning de capacité, diagramme de Gantt, planning de ressource, planning des exigences de matériaux). Toutefois, ces travaux propres à l'industrie manufacturière ne sont pas réutilisables dans nos travaux dans la mesure où les flux entrants et sortants sont fixes et la chaîne logistique préalablement définie.

Les méthodes et les outils présentés dans le Tableau II-8 s'appuient majoritairement sur des méthodes d'optimisation pour adapter au mieux la production de manière efficace selon la typologie de la chaîne logistique et les parties prenantes.

### II.4.3. Enseignements de la revue de littérature dans le Génie Industriel

Contrairement au Génie des Procédés, l'agilité est un concept mature au sein du Génie Industriel. Ce concept fait l'objet de recherches depuis plus de trente ans. Des définitions claires et détaillées mettent en avant les principales caractéristiques de l'agilité : une flexibilité de la capacité de production, un réseau de partenaires et une réponse rapide. Ce qui est généralement recherché est de pouvoir ajuster, réorganiser une chaîne de production existante en y adaptant un équipement, un module. Le but est d'optimiser les paramètres de production (capacité, fonctionnalités, ...) pour une même gamme de produits.

Dans le domaine de la production manufacturière, l'implémentation de l'agilité repose non seulement sur une vision globale de l'environnement de production mais également sur une réorganisation stratégique basée sur la collaboration, l'implication des différents partenaires (internes et externes) et les technologies de l'information et de la communication (digitalisation de la chaîne de

---

production dans un contexte de quatrième révolution industrielle). Ils amènent à repenser l'organisation et la structure de la production.

Les enseignements de cette revue de littérature précisent la démarche de recherche à adopter pour répondre à la problématique scientifique préalablement posée dans le chapitre I.

## II.1. Cadre de notre proposition

### II.1.1. Hypothèses de travail pour notre proposition

Pour l'ensemble de la chaîne de transformation de la matière, nous considérons qu'il n'y a pas de partie prenante dominante ou de mécanisme de coopération privilégiant une partie prenante plutôt qu'une autre.

#### Hypothèse 1

Ces travaux de thèse ne traitent pas de la gouvernance entre les différentes parties prenantes de l'industrie de procédés.

L'agilité devrait permettre à l'industrie de procédés qui la met en œuvre de rester compétitive sur le marché. Même si cette notion est particulièrement abordée dans la définition du concept de l'agilité, le modèle économique associé à l'implémentation de l'agilité est très peu documenté.

#### Hypothèse 2

Ces travaux de thèse n'abordent pas le modèle économique.

### II.1.2. Démarche de recherche

En lien avec la problématique scientifique énoncée dans le chapitre I, les questions de recherche auxquelles nous allons tenter de répondre sont de trois ordres.

L'agilité est un concept qui n'est pas détaillé et documenté dans le Génie des Procédés. Ainsi, en s'appuyant sur les enseignements de la revue de littérature, la première question de recherche a pour objectif de déterminer le cadre conceptuel de l'agilité pour l'industrie de procédés.

#### Question de recherche 1

Comment conceptualiser l'agilité pour l'industrie de procédés ?

Pour mettre en œuvre cette conceptualisation de l'agilité, il est nécessaire de développer une approche méthodologique générique avec un point de vue métier. De plus, afin de détecter les changements survenant dans l'écosystème du procédé et de s'y adapter avec réactivité et efficacité, il est intéressant que les sources de données pertinentes puissent être prises en compte. Puis, en réponse aux changements, l'exploitation de la connaissance permet de reconfigurer la chaîne de transformation de la matière adéquate. La deuxième question de recherche a pour objectif de détailler ce cadre et d'en expliquer les principaux mécanismes.

#### Question de recherche 2

Quelle approche méthodologique pour développer l'agilité ?

Pouvoir reconfigurer la chaîne de transformation de manière automatique favorise une aide à la décision dans des délais courts vis-à-vis des changements détectés dans l'écosystème. Dans cette perspective, la troisième question de recherche a pour objectif d'implémenter le cadre méthodologique dans un prototype logiciel. Ses fonctionnalités doivent aller au-delà de l'ajustement et de la réorganisation d'une chaîne de production existantes, comme cela existe dans l'industrie manufacturière.

Question de  
recherche 3

Comment implémenter l'agilité ?

---

Ce cadre sera appliqué à un cas d'application concernant la transformation de la biomasse.

---

## II.5. Conclusion

La mise en œuvre de l'agilité dans l'industrie de procédés requiert une méthodologie et des outils adaptés. Une revue de la littérature a permis de situer la proposition de ces travaux de thèse par rapport à l'existant.

Une première étape a été de définir l'agilité pour l'industrie de procédés. Pour ce faire, une revue de littérature a été menée au sujet des définitions de l'agilité dans le paysage de l'ingénierie. L'agilité est un terme largement présent dans les domaines de projet informatiques et de l'ingénierie de production. À l'issue de cette revue, nous nous sommes appuyés sur le polyptique : détection, adaptation, réactivité et efficacité qui s'applique à tout système complexe. Autrement dit, après avoir détecté les évolutions qui impactent le fonctionnement du procédé, les adaptations adéquates sont mises en place avec efficacité dans une échelle temporelle pertinente.

Une deuxième étape de la revue de littérature a ciblé les méthodes et les outils de l'agilité dans le Génie des Procédés. En l'absence de conceptualisation claire, de cadres et de méthodes existants, il n'en demeure pas moins un fort ancrage de la flexibilité et de modularité dans ce secteur.

Une troisième étape de la revue de littérature s'est orientée vers le Génie Industriel. Le concept d'agilité a fait l'objet de nombreuses définitions dans le cadre de la production manufacturière (domaine où le concept d'agilité a été nommé pour la première fois dans les années 90) mais aussi de la chaîne logistique. C'est avec un certain niveau de maturité que le concept de l'agilité a été défini et que des cadres de mise en œuvre, des outils et des nouvelles approches ont été développés. Ils reposent sur des axes comme la réorganisation de la production basée sur la collaboration en impliquant les partenaires, des offres de produits et de services au plus proches des attentes des clients et la forte utilisation des technologies de l'information et de la communication.

Cette revue de littérature confirme que l'agilité dans le Génie des Procédés n'en est qu'à ses débuts. Le contexte de production de ces travaux de thèse place l'agilité de la chaîne de transformation de la matière dans le sillage des approches par des chercheurs comme (Bogle, 2017). Ainsi, l'agilité se positionne au-delà de la modularité et de la flexibilité, sur toutes les composantes permettant la transformation de la matière. Compte tenu des liens entre le Génie Industriel et le Génie des procédés sur la vision système, des concepts structurants de l'agilité dans le Génie Industriel peuvent être réutilisés pour composer notre conceptualisation de l'agilité pour l'industrie de procédés.

Ce cadre conceptuel présenté dans la section suivante constitue la première étape de notre proposition.



**PARTIE B : PROPOSITION  
– METHODE  
DEVELOPPEE ET  
APPLICATION**

---



## **Chapitre III. Conceptualisation de l'agilité pour l'industrie de procédés**

---

La conceptualisation de l'agilité est la condition sine qua none pour bâtir notre proposition. Pourtant, ce concept n'en est qu'à ses balbutiements en Génie des Procédés.

En s'appuyant sur les enseignements de la revue de la littérature réalisée dans le chapitre II, une première partie mettra en exergue les concepts retenus pour supporter l'agilité dans l'industrie de procédés. Puis une seconde partie, détaillera notre proposition de conceptualisation de l'agilité.

### III.1. Concepts retenus pour supporter l'agilité

Les concepts retenus se situent à l'interface des trois axes dégagés dans le chapitre I : l'Usine du Futur, la chaîne de transformation de la matière ainsi que les infrastructures et les réseaux d'acteurs comme présenté sur le diagramme de Venne de la Figure III-1.

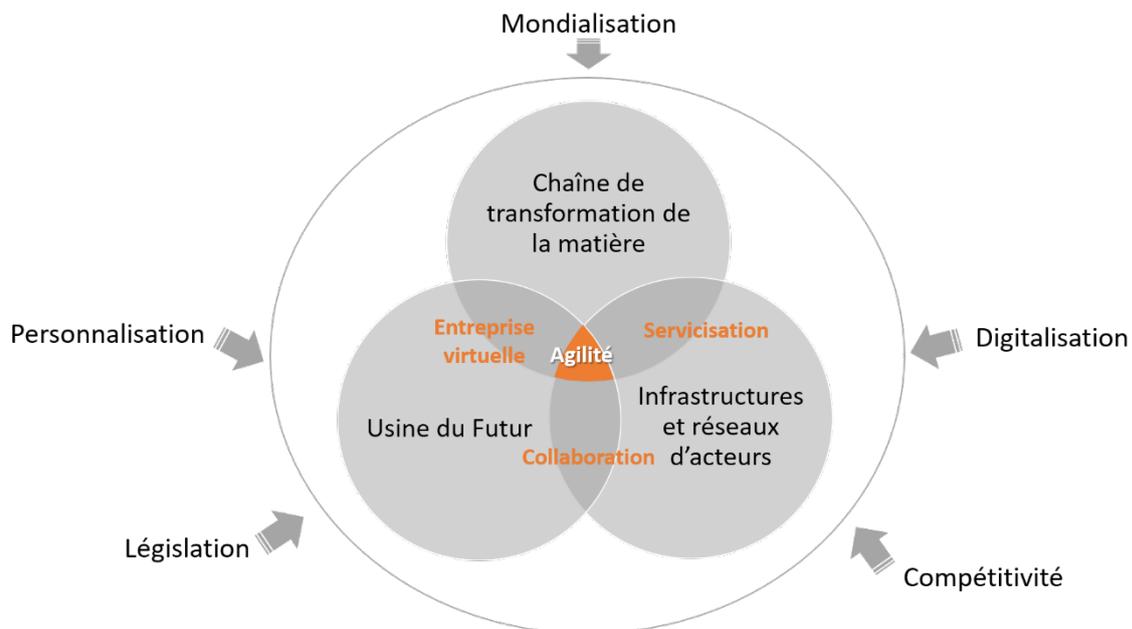


Figure III-1 : Thématiques de travail et concepts retenus pour conceptualiser l'agilité dans l'industrie de procédés

#### III.1.1. Collaboration

##### III.1.1.1 Définition

La collaboration est considérée comme un moyen de parvenir à la transformation de la matière, résultant d'une succession de services fournis par les acteurs locaux, en fonction des changements, des besoins et des contraintes.

Un réseau collaboratif est défini par (Luis M. Camarinha-Matos, 2009) comme :

*« Une variété d'entités qui sont largement autonomes, géographiquement distribuées et hétérogènes en termes d'environnement opérationnel, de culture, de capital social et d'objectifs, mais qui collaborent pour mieux atteindre des objectifs communs ou compatibles[...] ».*

Pour les entreprises industrielles, être organisées en réseau est un véritable avantage concurrentiel pour évoluer durablement dans un contexte incertain et volatil (Durugbo, 2016). Cette perspective met en évidence les savoir-faire et les équipements locaux existants. Ceci vient renforcer l'ancrage territorial des acteurs. Ainsi, l'aspect purement fonctionnel du procédé évolue pour y intégrer son environnement.

(Camarinha-Matos et al., 2017, 2019; Camarinha-Matos et Afsarmanesh, 2005) proposent une taxonomie des réseaux collaboratifs selon des aspects organisationnels, temporels ou encore de production sur la Figure III-2.

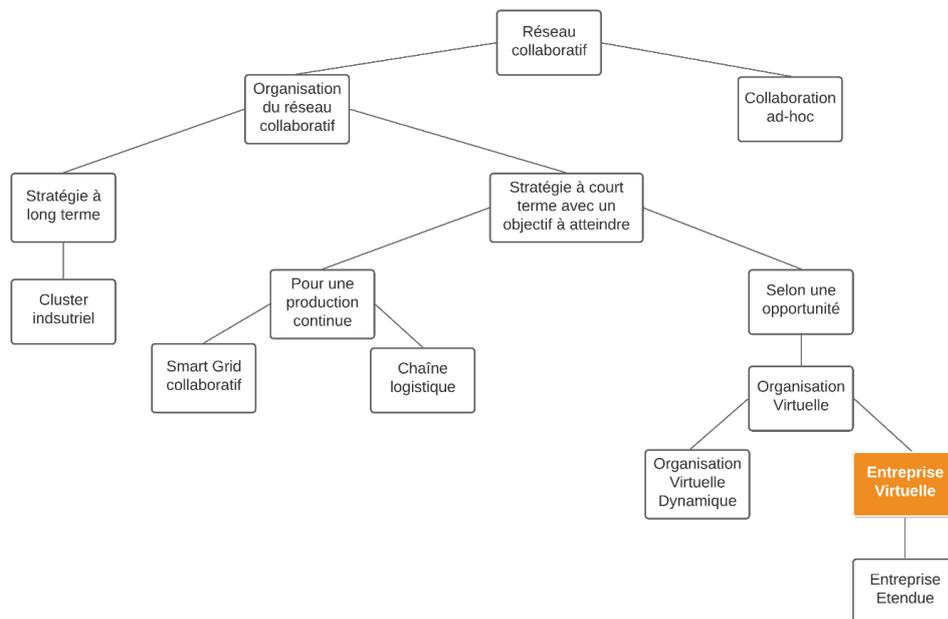


Figure III-2 : Taxonomie partielle des réseaux collaboratifs adaptée de (Camarinha-Matos et al., 2017, 2019, Camarinha-Matos et Afsarmanesh, 2005)

### III.1.1.2 Différents types de réseau collaboratif

Parmi les différents réseaux collaboratifs, présentés sur la Figure III-2, les plus pertinents pour caractériser l'apport d'agilité au sein de la chaîne de transformation de la matière sont de la famille de l'organisation virtuelle. L'organisation virtuelle est définie par (Afsarmanesh et Camarinha-Matos, 2005) comme :

*« Une alliance temporaire d'entreprises qui travaillent ensemble pour partager des compétences et des ressources pour mieux répondre aux opportunités ».*

Parmi, les différents types de réseaux collaboratifs appartenant à l'organisation virtuelle, l'entreprise virtuelle est citée par plusieurs auteurs dans différents métiers comme un levier de l'agilité (Camarinha-Matos et al., 2000; Kwon et al., 2003; Samdantsoodol et al., 2017; Wu et Su, 2005). Selon, (Afsarmanesh et Camarinha-Matos, 2005) l'entreprise virtuelle se distingue par le « partage de compétences et de ressources qui n'est pas limité à une alliance d'entreprise à but lucratif ». (Martinez et al., 2001) expliquent que l'entreprise virtuelle répond à une opportunité, dans le cadre d'un marché changeant. Ce type de réseau collaboratif favorise ainsi la mise en commun de capacités provenant des membres du réseau.

L'entreprise étendue concerne davantage une entreprise dominante qui ouvre ses frontières à l'ensemble (ou une partie) de ses fournisseurs. Il s'agit d'une seule et même entreprise où l'ensemble de ses partenaires internes et externes collaborent étroitement et se concentrent sur la réalisation d'un même projet. L'entreprise AIRBUS en est un exemple (Davis et Spekman, 2004). Elle correspond aussi au dernier stade d'évolution de l'entreprise virtuelle.

Très proche conceptuellement de l'entreprise virtuelle, l'organisation virtuelle dynamique est une organisation virtuelle qui se forme pour répondre à une opportunité et qui se dissout une fois que l'objectif commun est accompli. Elle se caractérise par un très court cycle de vie (Camarinha-Matos et Afsarmanesh, 2005). Elle se place dans le cadre d'un marché très compétitif. Or, le périmètre de ces travaux s'établit sur un marché de niche ce qui correspond plus à un réseau collaboratif de type entreprise virtuelle.

### III.1.1.3 Entreprise virtuelle, levier de l'agilité

L'essence même de l'entreprise virtuelle répond à l'un des objectifs de l'agilité qui est de saisir des opportunités. Dernièrement, les travaux de (Trzcielinski, 2020) ont concerné l'impact des changements de l'environnement sur l'agilité des entreprises, et notamment la capacité de saisir des opportunités. Il ajoute que les opportunités sont à considérer ici comme une « situation existante dans l'environnement de l'entreprise qui favorise la réalisation de ses objectifs avec l'utilisation des ressources disponibles ».

(Samdantsoodol et al., 2017) ont travaillé sur l'identification et l'analyse des relations entre les moteurs et les facteurs qui fournissent un avantage stratégique dans le cas de collaborations inter-organisationnelles. Ils ont conclu que la formation d'entreprises virtuelles représente une stratégie d'entreprise en tant que telle et confère un véritable avantage concurrentiel. Il permet à l'ensemble du réseau de faire preuve d'agilité dans le développement des compétences et des ressources ainsi que la reconfiguration de la chaîne logistique. Les travaux de (Durugbo, 2016) vont également dans ce sens.

Néanmoins, dans le domaine de la transformation de la matière, seuls quelques articles ont été publiés sur la collaboration concernant la chaîne de transformation, y compris les opérations logistiques. Ils concernent la collaboration avec un nombre limité à deux acteurs (Kim et al., 2011) ou ne prennent en compte que les critères du coût logistique des produits intermédiaires pour évaluer la faisabilité de la décentralisation (Bowling et al., 2011). Il est nécessaire d'aller plus loin dans la dynamique de la collaboration tant sur les membres de la collaboration que les facteurs qui la caractérise. Ainsi, l'augmentation du nombre d'acteurs impliqués dans la collaboration, la prise en compte des étapes de transformation sur un plan fonctionnel et non fonctionnel et l'intégration des aspects logistiques sont des pistes à considérer pour enrichir et améliorer ces premières propositions.

La nature interdisciplinaire des réseaux collaboratifs (Camarinha-Matos et al., 2017) induit la participation de partenaires hétérogènes de différents corps de métier couvrant l'ensemble de la chaîne logistique. Sur ce point, la sélection des partenaires au sein d'une entreprise virtuelle est fondamentale (Crispim et al., 2015). L'évolution des Technologies de l'Information et de la Communication ont permis de faire progresser la manière de créer un réseau collaboratif ainsi que la sélection des partenaires (Camarinha-Matos, 2014).

Cette sélection peut être réalisée grâce à différents outils :

- Un programme d'optimisation (Nguyen et Chen, 2018),
- Une approche système multi-agent (Rezaei et al., 2019),
- Des algorithmes heuristiques et métaheuristiques pour les problématiques multicritères (Xiao et al., 2014).

Dans notre cas, la formation de l'entreprise virtuelle s'effectue selon une offre et une demande clairement identifiée, mais pour laquelle la chaîne de transformation de la matière est à définir. En effet, l'objectif repose sur la collaboration d'acteurs qui possèdent des compétences et des ressources cohérentes et compatibles pour les opérations de la transformation de la matière donnée. Par contre, il n'est en aucun cas exigé que ces acteurs soient déjà partenaires dans une chaîne de production

---

existante. Ce qui diffère des approches présentées précédemment. En effet, ces dernières présupposent que la chaîne logistique est existante. Ceci explique pourquoi les outils précédemment cités ne seront pas utilisables dans notre approche.

### III.1.2. Servicisation

#### III.1.2.1 Définition

En plus de détenir un produit qui répond en tous points à ce qu'ils souhaitent, les clients s'attendent également à se voir offrir des services additionnels. (Neely, 2008) estime que cette pratique favorise l'innovation des pratiques et des processus des organisations afin qu'elles puissent créer de la valeur en passant de la vente de produit à la vente de systèmes de services. Ce constat illustre une vision obsolète du produit vu comme un objet isolé et indépendant. En effet, depuis une vingtaine d'années, la servicisation représentant le continuum entre le bien et le service s'impose. Ce concept souligne l'émergence d'une ère du service dans le secteur de la production industrielle.

Les travaux de (Penrose, 1959) marquent les prémices de la servicisation. La première définition du terme **servicisation** est attribuée à (Vandermerwe et Rada, 1988) qui la définissaient comme une :

*« Offre groupée intégrant la combinaison de biens, de services, d'assistance, de libre-service et de connaissance axée sur le client pour ajouter de la valeur à l'offre de produit de base ».*

Alors que les services occupent une place de plus en plus importante dans l'industrie, ce concept apparaît comme une réponse aux besoins changeants et à la demande de personnalisation des produits de plus en plus forte (Kamp et Parry, 2017). Depuis sa première définition en 1988, ce concept continue de faire l'objet de nombreux travaux.

#### III.1.2.2 Concepts dérivés

Parmi les plus marquants, les travaux de (Giarini et Stahel, 1989), concernant **l'économie de fonctionnalité** visent à optimiser l'utilisation (ou la fonction) des biens et des services afin de créer de la valeur d'usage tout en limitant la consommation de ressources. On peut noter que depuis l'apparition du terme, ce sont aujourd'hui plus de 12 400 articles publiés<sup>2</sup>. Une terminologie riche et variée en découle : économie de service centrée sur l'utilisation (Stahel, 1994), économie fonctionnelle (Stahel, 1997), transition de servicisation (Oliva et Kallenberg, 2003), **Système Produit Service (PSS)** (Baines et al., 2007; Goedkoop et al., 1999).

Sur ce dernier point, le PSS, cas spécifique de la servicisation, représente « une combinaison de produits et de services dans un système qui fournit de la fonctionnalité aux consommateurs et réduit l'impact environnemental » (Goedkoop et al., 1999). Cette idée de durabilité appliquée au produit étendu a été étayée par les travaux de (Annarelli et al., 2016; Cavalieri et Pezzotta, 2012; D'Agostin et al., 2020; Vezzoli et al., 2015).

Le PSS fait l'objet de différentes orientations (Baines et al., 2007; Tukker, 2004) que l'on peut résumer en trois grandes catégories : i) les services orientés vers les produits (des services supplémentaires sont ajoutés à un produit de base), ii) les services orientés sur l'usage (le client n'achète pas un produit mais son utilisation ou sa disponibilité) iii) et les services orientés vers les résultats (le

---

<sup>2</sup> A la date du 15 juillet 2020 (Science Direct, Google Scholar)

fournisseur vend un résultat et établit un accord de principe ou contractuel avec le client à propos de la performance attendue).

Trois approches majeures présentées dans la Figure III-3 se distinguent dans la conception d'une offre intégrée de biens et de services : l'économie de fonctionnalité, la servicisation et le système produit-service. Ces dernières s'adressent à des échelles de pilotage et de gestion différentes, selon le point de vue adopté. En effet, selon (Dahmani, 2015), ces approches font respectivement référence à une vision :

- Macroéconomique relative à un nouveau paradigme industriel placé sous le signe du service,
- Stratégique au niveau de l'entreprise (et de son réseau),
- Tactique et opérationnelle allant de la conception jusqu'à la mise à disposition de l'offre intégrée produit-service.

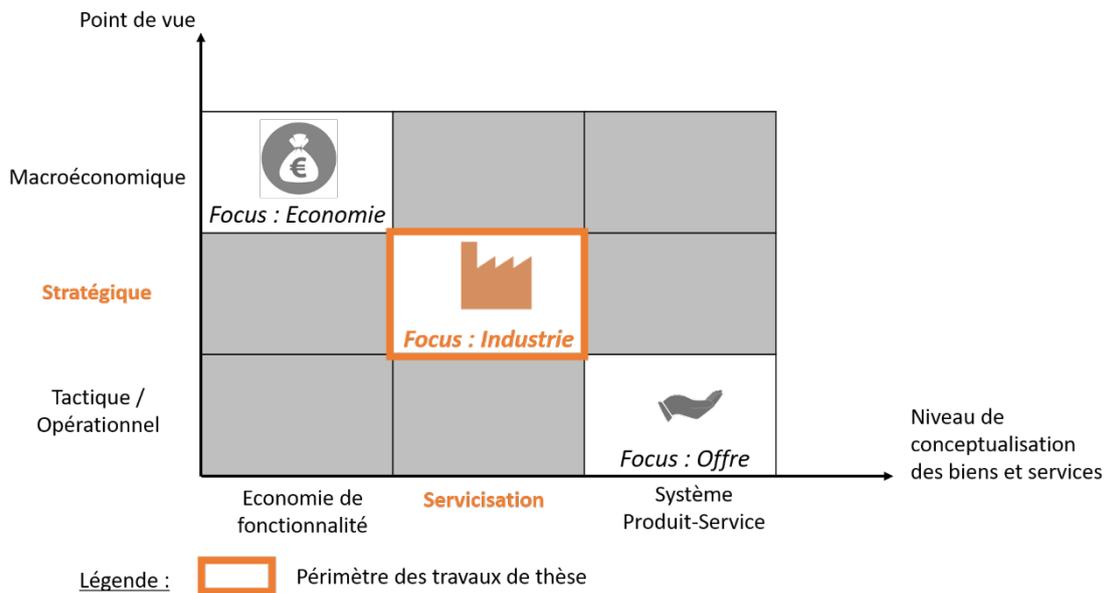


Figure III-3 : Classification des concepts relatifs à une offre intégrée de biens et de service adaptée de (Dahmani, 2015)

Compte-tenu de la classification précédente, ces travaux de thèse se positionnent au niveau stratégique, dans la mesure où ils visent la mise en œuvre de l'agilité au sein d'un réseau collaboratif d'entreprises. C'est ainsi la servicisation de la chaîne de transformation de la matière qui est recherchée.

Tout en s'inscrivant dans le sillage de l'économie de fonctionnalité, la servicisation et le système produit service sont davantage tournés vers des solutions stratégiques et de management pour l'industrie manufacturière ; l'objectif étant de créer de la valeur ajoutée sur les produits de base générés par l'entreprise. En France, les recherches autour de la servicisation ont été initiées avec l'analyse des dynamiques de modèles économiques d'entreprises basée sur une stratégie de service (Gaglio et al., 2011). Par ailleurs, nous supposons alors que, dans une approche conceptuelle, la servicisation peut être envisagée dans l'industrie de procédés. Dans ces travaux de thèse, la dynamique de la servicisation ainsi que les modèles d'évaluation et de transition (économique, juridique, stratégique) tels qu'étudiés dans le projet ServINNOV, sont admis. Ce projet a analysé de manière approfondi les mécanismes de transition (organisationnel et stratégique) de l'entreprise industrielle de la production vers la vente d'une offre intégrée.

---

### III.1.2.3 Cadres existant de mise en œuvre

Les travaux de (D. Chen et Ducq, 2015; Ducq et al., 2012) ont permis le développement d'un cadre méthodologique pour la mise en œuvre de la servicisation pour les organisations virtuelles. Ce cadre vise à soutenir le passage d'une production axée sur le produit vers une production orientée vers le service, en assurant une cohérence entre les différents niveaux de l'entreprise. Il comporte un modèle et des outils de gestion des services tout au long de leur cycle de vie. Le cadre s'appuie sur une approche Service Dirigée par les Modèles basée sur l'Ingénierie Dirigée par les Modèles. Il contient les phases du cycle de vie du service (exigences, conception, tests et mise en œuvre). Il s'applique aussi bien au niveau commercial qu'au niveau technologique de l'entreprise.

En outre, (D. Chen et Gusmeroli, 2015) proposent un cadre de modélisation organisé pour la servicisation de la production selon trois dimensions : produit étendu, typologie de service et organisation de l'innovation de service. Combinés, ils constituent un outil d'aide à la décision qui soutient les entreprises pour déterminer leur position en matière d'offres de services. Ce cadre a été testé dans plusieurs entreprises qui souhaitent s'orienter vers la constitution d'une entreprise virtuelle orientée services, telles que la fabrication de machines-outils, la fabrication de téléviseurs et la fabrication de vêtements.

(Frank et al., 2019) établissent un lien entre la servicisation et l'Industrie 4.0 en développant un cadre de modélisation conceptuelle basé sur trois axes : le niveau de digitalisation (des services manuels aux services délivrés par les technologies de l'Industrie 4.0), le type de service offert et le modèle d'affaires. Le niveau de la mise en œuvre de la servicisation est évalué sur une échelle de complexité allant de très faible à très élevé. Ainsi, les services apportent non seulement de la valeur aux clients mais deviennent par ailleurs des vecteurs de données et d'informations qui vont venir nourrir et potentiellement améliorer le service.

Les recherches de mise en œuvre de la servicisation dans l'industrie des procédés sont peu nombreuses comparativement à l'industrie manufacturière. Dans ce secteur, depuis quelques années, un tournant est observé quant au type de production pour satisfaire la demande du marché (approche "market pull") mais également les demandes d'innovation technologiques (approche "technology push") (Kanignant et al., 2018).

Par ailleurs, (Pessot et al., 2019) mettent en lumière les modifications des pratiques collaboratives lorsque la servicisation est mise en œuvre. Ces dernières créent de nouvelles relations entre le fournisseur et le client final, à l'origine d'une amélioration de l'agilité tout au long de la chaîne logistique. En se basant sur les travaux de (Pessot et al., 2019), la servicisation (l'offre de service intégrée proposée par des parties prenantes de la chaîne logistique) facilite la réalisation d'un procédé collaboratif impliquant plusieurs acteurs. En effet, en considérant les étapes du procédé comme des briques élémentaires réutilisables et attribuables, la servicisation permet d'appuyer une nouvelle forme de collaboration à l'origine d'une entreprise virtuelle. La servicisation est une composante essentielle de notre approche de l'agilité dans l'industrie de procédés. En effet, elle articule les concepts de collaboration et d'entreprise virtuelle. Elle permet, non seulement, de supporter la décentralisation de la chaîne de transformation mais également la mise en œuvre de la transformation de la matière de manière collaborative.

En ce qui concerne l'industrie de procédés, selon les travaux de (von Delft et Zhao, 2020), les entreprises doivent allier non seulement les solutions technologiques mais aussi intégrer les services dans les procédés pour proposer des solutions en accord avec les besoins des clients. Dans cette voie, (Buschak et Lay, 2014; Kanignant et al., 2018) montrent que les trois types de modèles d'entreprise qui encouragent la servicisation dans l'industrie de procédés. Le premier modèle est celui des services de

produits chimiques appelé Chemical Product Services (CPS). Il consiste à introduire des offres de services supplémentaires dans la vente traditionnelle de produits chimiques entre les fournisseurs et les clients. La priorité est donnée à la vente et à l'utilisation d'offres de services intégrées. Le deuxième modèle concerne les services de gestion des produits chimiques appelés Chemical Management Service (CMS). Il s'appuie sur une politique de contrats à long terme entre clients et fournisseurs. Le troisième modèle est le crédit-bail chimique appelé Chemical Leasing (CL). Ce modèle est encouragé par les Nations Unies pour le Développement Industriel (UNIDO). Il permet de mettre à disposition des produits chimiques au lieu de les vendre. Des pays européens comme l'Autriche et la Serbie ont appliqué ce modèle dans des activités concernant respectivement le nettoyage de métaux par un solvant et la lubrification de machines-outils (Clark et al., 2016).

Il est intéressant de souligner que dans la littérature relative à l'industrie de procédés, la servicisation est étudiée du point de vue macroscopique, au niveau économique de l'entreprise. Sur ce point, il existe des cadres de réalisation qui détaillent le processus de servicisation (Andriankaja et al., 2018; T. Baines et al., 2020; Kanignant et al., 2018) pour accompagner la transition des entreprises vers la servicisation des business modèles. Parmi les cadres existants, les travaux de (Fliess et Lexutt, 2017) se détachent en ne ciblant pas le produit de manière exclusive. En effet, les auteurs proposent un processus de servicisation générique en trois étapes. La première étape concerne l'offre de services présentant et décrivant les différents types de services fournis par l'entreprise, qui peuvent être des services liés au produit ou des services propres. La seconde étape représente le chemin vers la transition de services qui détaille les étapes suivies par l'entreprise dans le processus de servicisation. La troisième étape comprend la stratégie de servicisation qui intègre les plans et les actions entrepris pour atteindre les objectifs de l'entreprise en matière de services. Toutefois, nous constatons une absence de cadre pour soutenir et guider la servicisation de la chaîne de transformation de la matière à une échelle stratégique mésoscopique. Notre proposition va s'inscrire à cette échelle.

La section suivante précisera ainsi notre proposition de conceptualisation de de l'agilité et de son application dans le Génie des Procédés.

## III.2. Proposition de conceptualisation de l'agilité

### III.2.1. Vers une chaîne de transformation intelligente

Au cœur de la servicisation, le continuum entre le bien et le service est fréquemment représenté par la pyramide du système produit-service proposé par (Bork et al., 2016; Goedkoop et al., 1999). Ces auteurs s'appuient sur ce modèle pour développer le concept de « Smart product » : une vision hybride du produit-service digitalisé. Le service et le produit ne sont plus différenciables pour le client, formant un tout. Il s'agit par exemple de la mobilité sur demande utilisant des voitures autonomes, dans le cadre d'une « Smart City ».

Cette idée peut être étendue à l'industrie de procédés. Dans ce cas, en réalisant un parallèle, ce n'est plus seulement le produit issu de la transformation mais toutes les étapes permettant la transformation de la matière (le procédé et les opérations logistiques) qui pourraient être associé à un service, pour atteindre le « Smart processing chain » ou « Chaîne de transformation intelligente » comme présenté sur la Figure III-4. Dans ce cas, la chaîne de transformation se construit selon les besoins, les services existants et l'environnement de l'environnement de production au plus près des clients finaux.

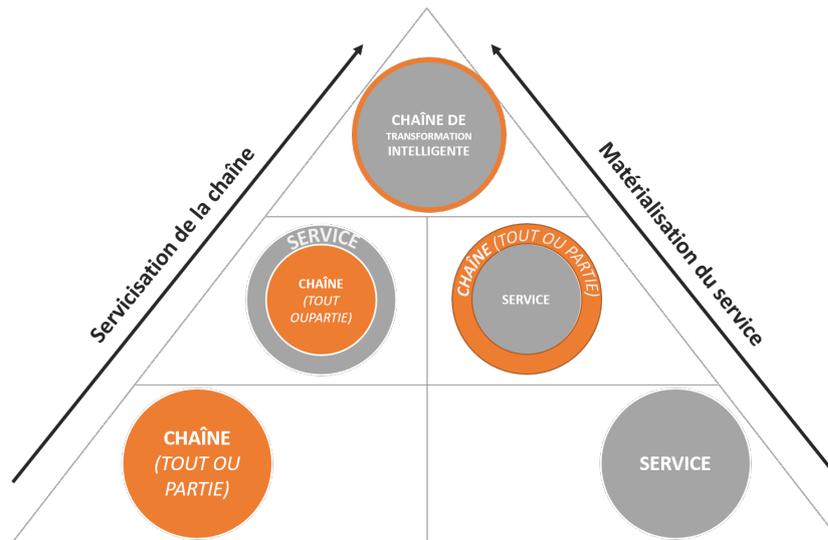


Figure III-4 : Relation chaîne de transformation-service adaptée de (Bork et al., 2016; Goedkoop et al., 1999; Karagiannis, 2019)

### III.2.2. Vision système de l'industrie de procédés

Suivant les technologies employées, le procédé revient à être considéré comme une succession logique d'opérations de transformation. Ainsi, le système de l'industrie de procédés comprend l'industrie de procédés ainsi que son environnement.

Il existe différentes typologies et classifications du système selon les échanges avec l'environnement (ouvert, fermé), la nature (naturel, artificiel, social), l'organisation (hiérarchique, en réseau), le comportement ou encore les technologies employées (Noyes et Peres, 2007). Cette diversité de caractérisations possibles s'accompagne de la diversité des éléments et des interactions qui peuvent composer le système, soulignant sa complexité. Entre toutes les approches définies du système nous retiendrons celle de (Le Moigne, 1994) qui décrit le système comme un ensemble d'éléments en interaction dynamique et évolutive au cours du temps, dans un environnement donné. Ces interactions créent de nouvelles propriétés (qui n'existaient pas au sein des éléments au départ). De plus, le système peut être considéré sous un point de vue structurel (étude analytique des éléments simples qui constituent le système) ou sous un point de vue temporel (étude de la dynamique d'évolution des interactions du système).

Ce positionnement permet d'adopter une approche dite systémique ou approche système. Cette approche permet de comprendre l'ensemble du système en considérant sa complexité qui est générée non seulement par le nombre élevé de composants et variables qui le constitue, mais également par leurs interactions (Donnadieu et Karsky, 2002).

En s'appuyant sur les travaux de (Morin, 2005), l'analyse systémique repose sur quatre grands principes :

- L'interaction entre les éléments du système et notamment la rétroaction,
- La globalité du système qui est un tout non réductible à ses composants,
- L'organisation et l'agencement des relations entre les composants du système qui confèrent de nouvelles qualités au système,
- La complexité du système due à l'incertitude et aux aléas propres à l'environnement mais aussi due aux caractéristiques des éléments du système.

L'industrie de procédés fait partie de ces systèmes complexes qui font appel à de nombreuses composantes (composantes temporelles, physico-chimiques, spatiales, thermodynamiques, etc.) qui interagissent dynamiquement les unes avec les autres.

### III.2.3. Approche générale de notre proposition de conceptualisation

L'objectif est donc de concevoir un réseau collaboratif d'acteurs locaux pour transformer un gisement de matière première identifié en un produit ciblé, compte tenu des caractéristiques de l'écosystème (contexte, acteurs disponibles, équipements disponibles, etc.). La décentralisation est primordiale. Elle se traduit par une exécution du procédé par différents partenaires, dans différents sites et non plus dans un seul site, à l'échelle d'un territoire. La notion de territoire est dépendante du contexte géographique et administratif du pays concerné. La vision d'un territoire n'est pas la même aux Etats-Unis, en Allemagne ou encore en Polynésie. Dans le cas de ces travaux de thèse, la vision de territoire sera adossée aux proportions d'un canton, d'un département français métropolitain.

Toutes les étapes sont essentielles : de l'approvisionnement en matière première brute jusqu'à la livraison du produit final au client. Les éléments qui composent l'écosystème (le marché, les instances de gouvernance, le tissu économique, les clients, etc.), susceptibles d'influer sur le fonctionnement du système de traitement, induisent des variabilités de différentes sortes pouvant perturber son fonctionnement. Cette industrie de procédés est intégrée dans un environnement socio-économique et culturel. Une approche prenant en compte non seulement le procédé mais aussi son environnement permettrait de caractériser, adapter et piloter la chaîne de transformation de la matière pour un objectif de transformation donné.

Cette approche systémique offre une vision globale de l'industrie de procédé incluant le procédé et notamment les flux interagissant avec son environnement. De différentes natures (flux physique, flux d'information), ces derniers concernent, non seulement le système inhérent à la transformation de la matière, mais également les fournisseurs et les clients (les partenaires de la chaîne logistique) comme présenté dans la Figure III-5. C'est l'ensemble de la chaîne de transformation qui est concernée, c'est-à-dire les personnes, les biens et les activités engagés pour soutenir la transformation de la matière. Une vision système du procédé à l'échelle de la chaîne logistique est un aspect clé de notre conceptualisation de l'agilité. La gestion des activités et des flux qui la composent favorise une meilleure exécution de la production (en termes d'approvisionnement, de coûts, de délais, de qualité).

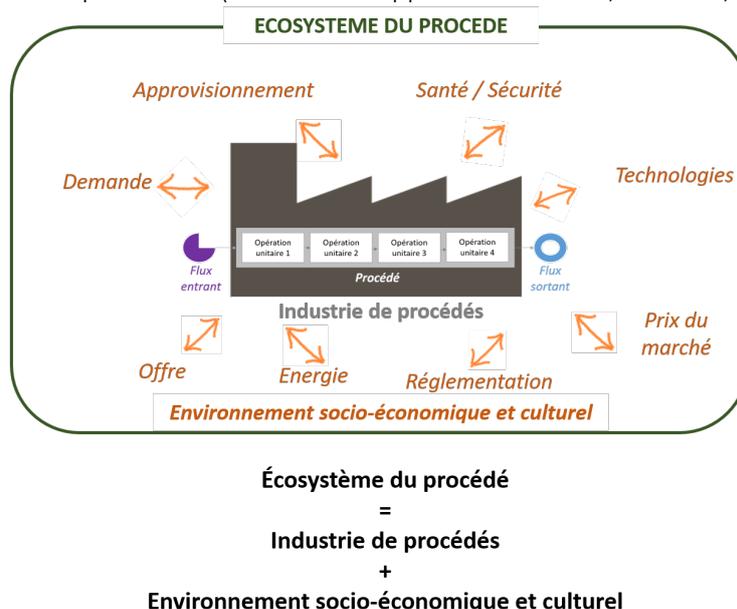


Figure III-5 : Représentation de l'écosystème de l'industrie de procédé

Après avoir précisé le périmètre de notre vision de l'agilité dans l'industrie de procédés, la section suivante pose notre proposition de conceptualisation.

Sur la base de cette décentralisation, chaque étape majeure de la transformation de la matière première (c'est-à-dire les différentes étapes de transformation) peut être effectuée à des emplacements différents. En outre, l'étape d'approvisionnement de la matière première et l'étape de livraison du produit sont également prises en compte dans la transformation décentralisée. Cette approche vise à construire une chaîne globale de la transformation de la matière en y incluant des opérations logistiques, avec un point de vue systémique.

En cas de changements dans le système en raison d'incertitudes (concernant l'offre, la demande, etc.), la chaîne de transformation est adaptée et fait appel aux services des acteurs concernés pour répondre aux besoins d'adaptation qui en découlent. Un service peut porter sur une ou plusieurs étapes de transformation de la matière première. Le rôle et l'implication de chaque acteur peut évoluer en fonction de ces changements. La collaboration entre les acteurs vise à réaliser une chaîne de transformation collaborative donnée, soutenue par les services des acteurs. De cette manière, il est plus facile de reconfigurer la chaîne de transformation, en sélectionnant le procédé pertinent et les services qui l'exécutent. Cela permet aussi de réduire les besoins de développement technologiques ou d'investissements financiers, tout en réutilisant l'existant. Ainsi, de l'agilité est apportée à la chaîne de transformation et permet de s'adapter aux besoins, comme illustré dans la Figure III-6.

Les avantages d'une telle vision de la chaîne sont d'abord i) de garantir l'agilité de l'ensemble du système dès les premières étapes de construction et ii) d'adapter le fonctionnement selon les changements de son écosystème. De plus, il n'est pas nécessaire de créer une nouvelle usine physique.

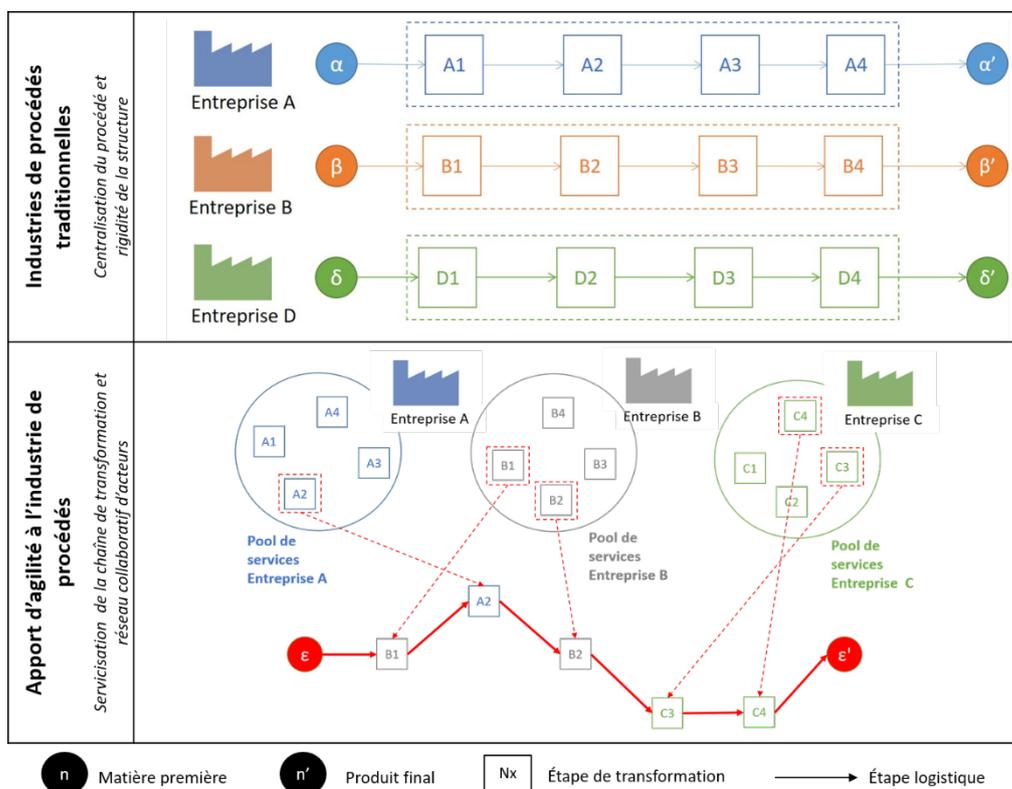


Figure III-6 : Illustration de la mise en œuvre de l'agilité dans l'industrie de procédés

Traditionnellement, la chaîne de transformation est établie en amont selon les orientations de l'entreprise (stratégiques, commerciales, techniques). Pour un procédé traditionnel se déroulant au sein d'une usine A, les étapes de transformation (par exemple A1, A2, A3 et A4) sont séquencées d'une

certaine manière (A1-A2-A3-A4) pour une matière donnée ( $\alpha$ ) et un produit final fixé ( $\alpha'$ ). Il en sera de même respectivement pour une usine B et D pour les matières premières  $\beta$  et  $\delta$ , pour les produits finaux  $\beta'$  et  $\delta'$  ainsi que les activités B1 à B4 et D1 à D4. À chaque étape de transformation est adossée des équipements et des conditions opératoires spécifiques. Dans ces configurations, la logique de fabrication prédéterminée se concentre principalement sur le fait qu'une étape soit opérationnelle. Ces dernières sont impactées par la disponibilité des opérations unitaires (et notamment des équipements qui les composent). Les arrêts planifiés (opérations de maintenance, essais), les arrêts non planifiés (défaillances machines, ralentissement de la vitesse d'un équipement) qui peuvent survenir sont susceptibles d'interrompre la bonne exécution de l'ensemble du procédé.

Dans le cadre de l'apport d'agilité à la chaîne de transformation, la logique se tourne davantage vers l'aspect fonctionnel et une valeur centrée sur l'usage des étapes de transformation. Le procédé se construit selon le contexte dans lequel il évolue. En effet, la dynamique de la situation collaborative est liée à l'offre de service fournie, qui n'est pas figée dans le temps. Les partenaires (représentés par les entreprises A-B-C sur la Figure III-6.) ne sont pas sélectionnés en avance. Leur sélection repose sur leur capacité à exécuter tout ou partie du procédé, grâce au pool de services qu'ils proposent. En s'appuyant sur le même pool d'activités que pour les procédés traditionnels, un séquençement différemment (B1-A2-B3-C3-C4) permet de valoriser une matière première  $\xi$  disponible sur le territoire pour la fabrication d'un produit final  $\xi'$  qui répond à un besoin identifié, sans avoir à créer une nouvelle usine physique E, et en utilisant des offres et matériels existants.

### III.3. Principes fondamentaux de notre proposition

#### III.3.1. Servicisation du procédé

Dans cette optique, les opérations unitaires sont vues comme les étapes au plus bas niveau de décomposition de la chaîne. Traditionnellement, les opérations unitaires ne sont pas perçues indépendamment du procédé dans lequel elles sont réalisées. Dans une approche collaborative, l'acteur met à disposition des opérations unitaires (ou un ensemble d'opérations unitaires) qui constituent une étape du procédé. Il est alors possible de présenter ces opérations unitaires comme des entités indépendantes et agencables. Ainsi, les opérations unitaires sont vues « as a Service ».

Prenons l'exemple d'un procédé de fabrication de granulés de bois. Un des acteurs pourra proposer un service de « séchage » qui comprendrait : un produit de base (un séchoir) avec des services intermédiaires (connaissance de la machine et de son fonctionnement, maintenance, changement de pièces détachées) et des services avancés (une garantie de production de deux tonnes par jour à raison d'un fonctionnement de cinq heures par jour en continu du séchoir). Cet exemple illustre les différents services qui peuvent être associés à une étape de transformation.

Dans cette perspective, la catégorie de PSS axée sur les résultats est proche de notre vision de l'implémentation de l'agilité. Le résultat fonctionnel (c'est-à-dire l'atteinte de l'objectif de transformation pour obtenir un (des) produit(s)) est primordial. En effet, c'est la capacité (les capacités) (c'est-à-dire un ou plusieurs services) proposée par chaque acteur de la collaboration qui est (sont) impliqué(s) pour réaliser une (ou plusieurs) étape(s) de la transformation selon l'objectif visé. La servicisation est une composante essentielle de notre approche de l'agilité dans le Génie des Procédés. En effet, elle articule les concepts de collaboration et d'usine virtuelle. Elle permet, non seulement, de supporter la décentralisation de la chaîne de transformation mais également la mise en œuvre de la transformation de manière collaborative de la matière.

### III.3.2. Chaîne de transformation collaborative

Au regard des éléments précédents, la chaîne de transformation s'apparente à une organisation virtuelle de type Entreprise Virtuelle. En effet, elle répond à une opportunité de transformation de la matière, qui n'est pas vouée à se pérenniser. Le caractère « local » n'est pas assimilable à un cluster industriel, car les entreprises ne sont pas forcément des partenaires qui travaillent ensemble ou qui partagent des produits, des technologies ou des connaissances. La caractérisation de la collaboration qui a lieu peut être basée sur les travaux de (A. Montarnal, 2015).

Ces derniers établissent un cadre en trois dimensions des réseaux collaboratifs présenté dans la Figure III-7 qui s'appuie sur :

- **Le degré de partage** des organisations, autrement dit ce que le partenaire décide d'avoir en commun lorsqu'il travaille avec d'autres organisations (Communication, Coordination, Coopération, Collaboration, Fusion),
- **La topologie** du management du réseau qui représente la dynamique de management (Accord court terme, Accord moyen terme, Accord long terme),
- **La perspective** du réseau qui se base sur la durée mais également sur l'objectif du réseau (Pair à pair, Chaîne, Etoile, Grille)

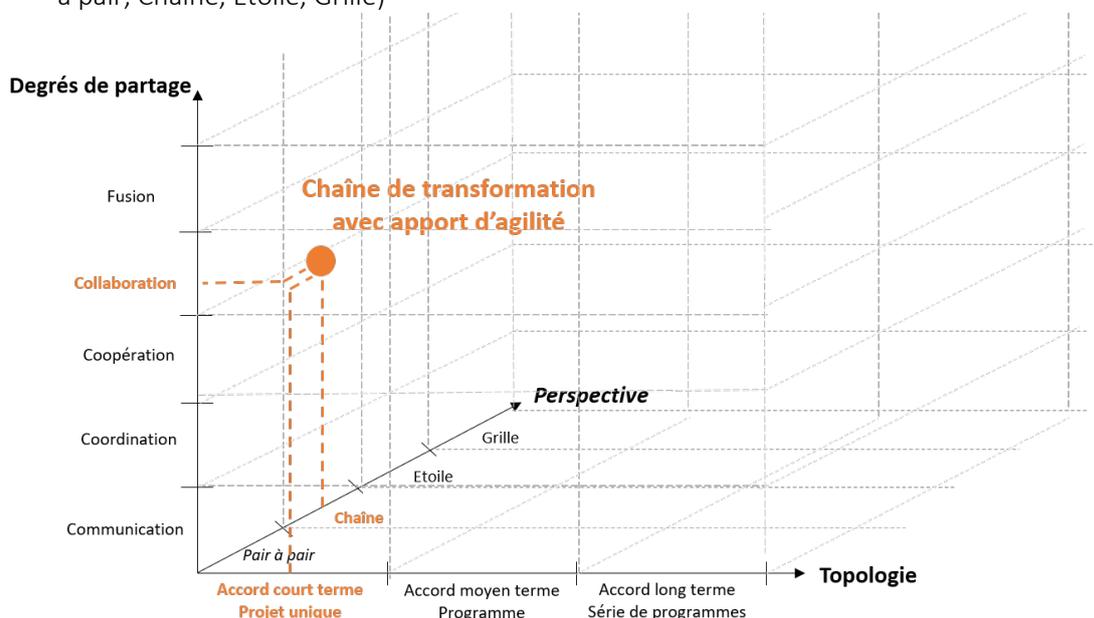


Figure III-7 : Caractérisation de l'apport d'agilité dans la chaîne de transformation de la matière selon les travaux de (Montarnal, 2015) (adaptation du cadre)

Ce cadre permet de caractériser l'apport d'agilité dans la chaîne de transformation de la matière comme une collaboration à court terme de type chaîne pour la réalisation d'un projet précis. Il met en jeu des organisations qui partagent un objectif commun pour une opportunité de transformation de la matière clairement identifiée. Pour mener à bien cet objectif, la topologie de type chaîne est associée à un système coordonné telle une chaîne logistique où les partenaires sont sélectionnés selon ce qu'ils peuvent fournir en termes de service pour satisfaire la demande de l'utilisateur final. Chaque partenaire de la collaboration s'auto-gère (ressources, temps, ...).

Par conséquent, une coordination globale est à prévoir pour déterminer l'ordre d'apparition des organisations au cours de la collaboration. Cette coordination est indépendante du réseau collaboratif (elle n'est pas menée par une des organisations du réseau). Dans notre cas, elle sera organisée par une plateforme qui sera détaillée dans le Chapitre IV. La caractérisation de la collaboration est intéressante dans la mesure où elle fournit des éléments pour sa compréhension et sa modélisation.

### III.4. Conclusion

En s'inspirant des méthodologies et outils existants de la littérature, les fondements de la mise en œuvre de l'agilité pour l'industrie de procédé se basent sur l'usine virtuelle, la collaboration des acteurs du territoire et la servicisation des étapes de la chaîne de transformation.

La collaboration des acteurs de la chaîne de transformation joue sur la réorganisation de la chaîne de transformation en cas de changement. Chaque acteur pourra proposer une offre de service qui réalisera tout ou partie des étapes de transformation. Son rôle et son implication évoluent en fonction des changements. Cette approche se formalise par un cadre méthodologique qui sera détaillé dans la suite de ce manuscrit.

Le chapitre suivant va s'atteler à développer la première partie de ce cadre méthodologique. Ce dernier a pour objectif de modéliser et de structurer la connaissance de l'écosystème d'un procédé, comme présenté sur la Figure III-8.

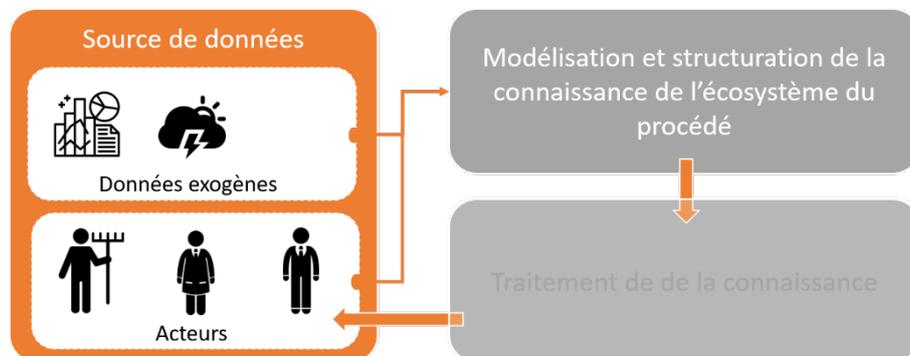


Figure III-8 : Vue globale du cadre méthodologique proposé dans le cadre de ces travaux

## **Chapitre IV. Modélisation de la connaissance de l'écosystème du procédé**

---

Le besoin d'agilité nécessite de repenser la chaîne de transformation de la matière au niveau structurel mais également au niveau organisationnel, en la décentralisant au travers la mise en place d'une entreprise virtuelle. Cette approche repose sur un réseau collaboratif d'acteurs supporté par la servicisation des étapes de transformation et la réutilisation des équipements. Dans cette perspective, il convient d'avoir une bonne compréhension de l'écosystème du procédé, c'est-à-dire de disposer des données nécessaires et de les organiser pour concevoir le réseau collaboratif tout en prenant en compte les facteurs endogènes et exogènes s'y rapportant.

Dans ce but, l'objectif est de présenter une description de l'écosystème du procédé en vue d'y apporter de l'agilité. Après avoir détaillé dans une première partie les objectifs et les enjeux en termes de modélisation, ce chapitre présentera dans une deuxième partie, le cadre de modélisation de l'environnement de la situation collaborative (acteurs, services, contexte, objectif et performance.) en vue d'amorcer la décentralisation du procédé. Puis, dans une troisième partie, le cadre de modélisation pour la servicisation du procédé sera abordé.

## IV.1. Objectifs et enjeux

### IV.1.1. Analyse des besoins

L'apport d'agilité dans la chaîne de transformation repose sur la construction d'un réseau collaboratif d'acteurs, du fournisseur de la matière première jusqu'au client final. Chaque acteur offrant un service met à disposition :

- Un savoir concernant un ou plusieurs procédés regroupant l'ensemble des connaissances théoriques (techniques et technologiques : équipement et leur dimensionnement, fonctionnel : organisation des opérations unitaires) acquises au cours de son expérience professionnelle,
- Un savoir-faire englobant l'ensemble des connaissances et compétences pratiques relatives aux ressources nécessaires (humaines, matérielles, économiques, logistiques) et aux conditions de réalisation opérationnelles permettant d'exécuter le procédé dans les règles de l'art.

La dynamique de ce réseau collaboratif d'acteurs, qui proposent des services, est également impulsée par des facteurs externes, appartenant à l'écosystème. À ce titre, selon (Samdantsoodol et al., 2017), une identification, une compréhension et une gestion non appropriées de ces facteurs impactent l'implantation de l'agilité au sein d'une entreprise virtuelle, pouvant la conduire jusqu'à l'échec.

Ainsi, les connaissances recueillies sur la situation collaborative sont essentielles pour définir la chaîne de transformation qui sera effectuée. À cela s'ajoutent des connaissances supplémentaires nécessaires pour sélectionner le procédé approprié (d'un point de vue physique, chimique et biologique) et également compte-tenu des caractéristiques de la matière première impliquée ainsi que du produit final souhaité. C'est pourquoi afin d'en faciliter la mise en œuvre, il est primordial de représenter de manière organisée l'ensemble de ces connaissances (Figure IV-1).

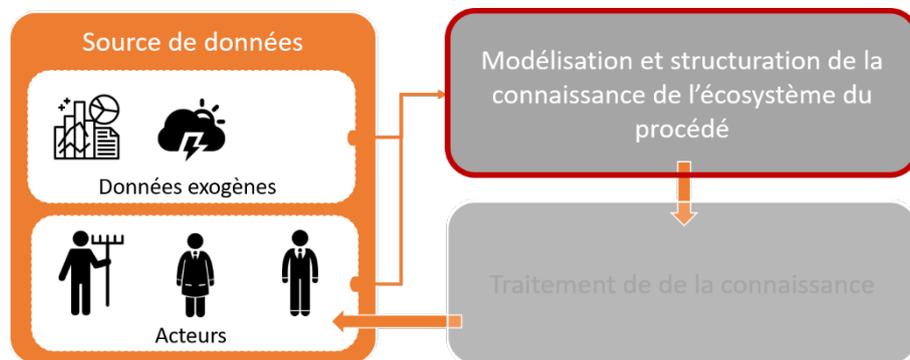


Figure IV-1 : Cadre méthodologique centré sur la modélisation et la structuration de la connaissance de l'écosystème

### IV.1.2. Objectifs attendus de la modélisation de la connaissance

#### IV.1.2.1 Objectifs de la gestion de la connaissance

L'objectif est d'organiser la connaissance impliquée dans l'écosystème de la chaîne de transformation de la matière, pour une situation donnée. C'est la structuration et l'articulation de cette connaissance qui soutient la construction du réseau collaboratif d'acteurs. La connaissance devient alors un levier majeur d'adaptation aux changements. Or, la connaissance repose sur la donnée, comme souligné sur la Figure IV-2. Avant de détailler quelles sont les données, les informations et la connaissance requises pour la modélisation de l'écosystème, il convient de préciser ces notions.

À cet effet, la pyramide de la connaissance établit une hiérarchie entre la donnée, l'information et la connaissance (Data Information Knowledge Wisdom DIKW Knowledge hierarchy). À noter que le niveau de la sagesse ne sera pas pris en compte dans ces travaux.

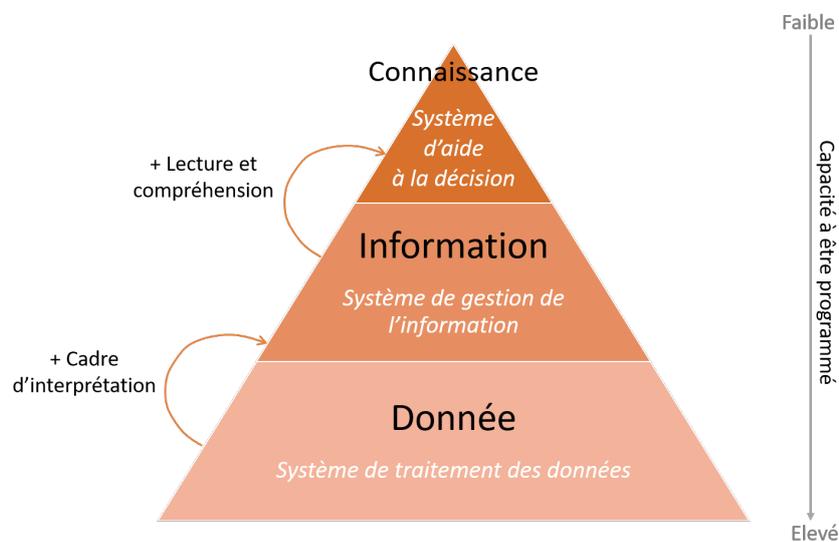


Figure IV-2 : Lien entre donnée, information et connaissance adapté de (Rowley, 2007)

Chaque terme peut être défini, individuellement (Rowley, 2007) :

*« **Les données** sont définies comme des symboles qui représentent les propriétés des objets, des événements et de leur environnement. Elles sont les produits de l'observation. Mais elles ne sont utiles que lorsqu'elles sont sous une forme utilisable (c'est-à-dire pertinente). La différence entre les données et les informations est fonctionnelle, et non structurelle. »*

*« **Les informations** sont contenues dans des descriptions, des réponses à des questions qui commencent par des mots tels que qui, quoi, quand et combien. Les systèmes d'information génèrent, stockent, récupèrent et traitent les données. L'information est déduite des données. »*

*« **La connaissance** est un savoir-faire, et c'est ce qui rend possible la transformation de l'information en instructions. La connaissance peut être obtenue soit par transmission d'une autre personne qui la possède, soit par instruction, soit par extraction d'une expérience. »*

(Rowley, 2007) établit une correspondance entre les niveaux de la pyramide de la connaissance et les niveaux hiérarchiques des Systèmes d'Information comme présenté dans la Figure IV-2. Ce parallèle propose ainsi une délimitation des rôles à jouer par les types de Systèmes d'Information selon le type d'élément rencontré (donnée, information, connaissance) et le cadre contextuel. En s'appuyant sur cette représentation, ces travaux de thèse visent donc à fournir un support d'aide à la décision à destination des décideurs, pour la mise en œuvre de l'agilité pour la transformation d'une matière première considérée. Ce support s'appuie sur la connaissance de l'ensemble de l'écosystème du procédé : le procédé lui-même et son environnement.

La section suivante met en évidence les avantages de la gestion de la connaissance dans notre approche d'agilité.

#### IV.1.2.2 Intérêts de la gestion de la connaissance

En l'absence d'une définition unique sur la gestion de la connaissance, les sphères académique et industrielle s'accordent sur un consensus. Propres à chaque organisation, les pratiques de gestion de la connaissance ont pour objectif d'apporter de la valeur ajoutée. Parmi les définitions existantes, celle de (Dalkir, 2017) réunit ces aspects :

*“Knowledge management is the deliberate and systematic coordination of an organization’s people, technology, processes, and organizational structure in order to add value through reuse and innovation. This coordination is achieved through creating, sharing, and applying knowledge as well as through feeding the valuable lessons learned and best practices into corporate memory in order to foster continued organizational learning”.*

D'après les travaux de (Dalkir, 2017), la gestion de la connaissance peut être abordée selon plusieurs points de vue :

- Métier : centrée sur la stratégie d'affaire et les performances de l'organisation considérée,
- Sciences cognitives : centrée sur l'exploitation des données pour en appréhender les mécanismes de compréhension,
- Processus/ Technologique : centrée sur la mise à disposition de connaissance exploitable et utilisable (après transformation de l'information en connaissance).

En s'appuyant sur les points présentés précédemment, ces travaux de thèse adoptent un point de vue métier et processus/technologique. En effet, ce qui est recherché ici est d'utiliser les informations issues de l'écosystème et du procédé lui-même pour créer un flux de données à destination du bon acteur du réseau collaboratif, au bon moment. Le partage des connaissances entre les partenaires du réseau sert non seulement la gestion de la connaissance pour la dynamique collaborative mais également pour exécuter la collaboration.

Dans ce sens, la section suivante présente les données, les informations et la connaissance nécessaires pour la représentation de l'écosystème du procédé.

#### IV.1.3. Données requises

##### IV.1.3.1 Au niveau de l'environnement du procédé

Afin de décentraliser la transformation de la matière au sein d'un territoire, il est nécessaire d'identifier les caractéristiques du fonctionnement du territoire considéré et les interactions entre ces caractéristiques. Ceci permet une première phase de description de l'écosystème avant de poursuivre vers une seconde phase qui explicite et formalise les enjeux et les contraintes du territoire visé. La volonté de valoriser la ressource disponible sur le territoire grâce à des partenaires qui sont situés sur celui-ci inscrit l'agilité de la transformation de la matière dans une perspective de durabilité et de compréhension des caractéristiques du réseau d'acteurs.

Dans cette optique et dans une vision orientée durabilité appliquée à l'agriculture, les travaux de (Craheix et al., 2012, 2016) proposent méthode appelée MASC (Multi-Attribute Assessment of the Sustainability of Cropping Systems). Ces travaux fournissent principalement des données, de l'information et de la connaissance sur le contexte lié au territoire. Toutefois, cette méthode ne permet

pas de couvrir l'ensemble de la dynamique de l'environnement du procédé. En effet, cette méthode se concentre surtout sur les impacts des activités agricoles sur les aspects environnementaux, sociaux et économiques sur les territoires. Les acteurs ainsi que les divers procédés de transformation agricole ne sont pas pris en compte.

Dans une volonté de comprendre les caractéristiques du réseau d'acteurs en vue de la collaboration, ce qui est recherché est de percevoir les différents acteurs impliqués et les liens entre eux et ce qui les entourent.

#### IV.1.3.2 Au niveau du procédé

La finalité du procédé oriente notre positionnement vers une analyse fonctionnelle de l'ensemble du procédé mais également de chaque activité de transformation qui le compose. En effet, se concentrer sur la fonction permet de déterminer l'action ou les actions à entreprendre pour satisfaire sa bonne exécution.

La fonction est définie par la norme (AFNOR, 2013) portant sur l'analyse fonctionnelle, comme étant :

*« Une action d'un produit ou de l'un de ses constituants exprimée exclusivement en termes de finalité ».*

De plus, la fonction peut être décomposée en sous-fonctions plus élémentaires. La bonne exécution de l'activité de transformation peut alors être réalisée par un ou plusieurs services répondant à l'activité et/ou à une sous-activité. Parmi les représentations existantes, la représentation SADT/IDEFO (Structured Analysis and Design Technique) (Ross, 1977; Ross et Schoman, 1977) s'attachent à modéliser des systèmes et processus complexes, comme les procédés, selon une approche système. Cette modélisation permet une analyse fonctionnelle descendante par module hiérarchique du niveau le plus général vers niveau le plus particulier sous forme d'actigrammes présentés dans la Figure IV-3.

Ils sont composés de :

- Données d'entrées : données transformées par l'activité en sortie,
- Données de sorties : données créées par l'activité,
- Mécanismes de contrôles : données contraignant l'activité,
- Mécanismes support : éléments qui réalisent l'activité.

Cette représentation est intéressante pour nos travaux car elle permet de décomposer la chaîne de transformation avec les données d'entrée et de sortie, en sous-activités de manière logique et ordonnée, avec un niveau de détail pertinent pour permettre la servicisation.

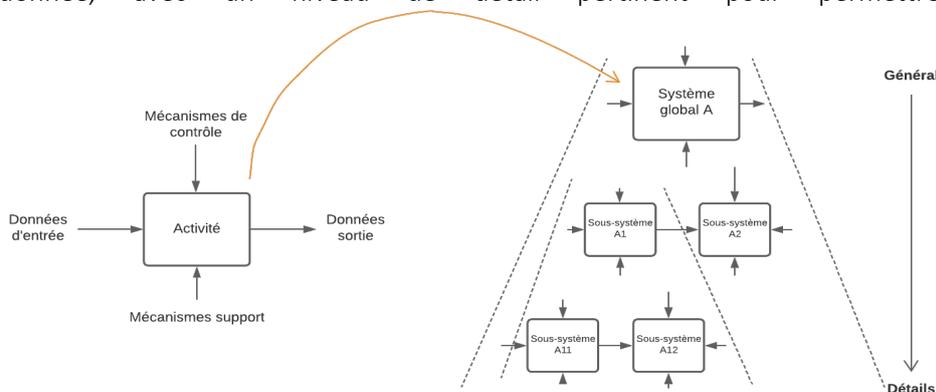


Figure IV-3 : Actigramme et décomposition hiérarchique selon (Ross, 1977)

Toutefois, la gestion de la connaissance nécessite l'utilisation d'un langage commun et la définition des relations entre les composants de ce langage. La section suivante présente la manière dont la connaissance de l'écosystème du procédé peut être modélisée.

## IV.2. Approches méthodologiques pour modéliser la connaissance de l'écosystème

La notion de modèle possède plusieurs définitions selon le domaine d'activité ou de recherche concerné. Parmi les définitions existantes, celle de (Minsky, 1965) fait consensus à travers les communautés scientifiques :

*« Pour un observateur B, un objet A\* est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A\* pour répondre aux questions qui l'intéressent sur A. »*

En effet, en plus d'être une simplification de l'objet qu'il représente, le modèle répond à un but visé devant répondre aux questions posées par l'observateur. Dans cette optique, cette section a pour objectif de déterminer un cadre de modélisation pertinent pour répondre à notre besoin d'agilité au sein de l'écosystème du procédé.

### IV.2.1. Approches existantes pour modéliser la connaissance dans le Génie des Procédés

#### IV.2.1.1 D'un point de vue des phénomènes physiques du procédé

Dans l'industrie de procédés, la modélisation de la connaissance intervient durant les phases de conception et les phases d'exploitation du procédé. Elle doit permettre la compréhension et la description des aspects physiques, chimiques et biologiques en jeu. Quoi qu'il en soit, le choix du modèle est intimement lié à son utilisation et la finalité souhaitées. Selon (Truong-Meyer, 2009; Zendehboudi et al., 2018), il existe différents types de modèles qui y répondent : connaissance pure, phénoménologique, hybride, empirique, comportemental, boîte blanche, boîte noire, data-driven. Par ailleurs, selon (Venkatasubramanian, 2019) en dépit des grandes avancées des différentes phases de l'Intelligence Artificielle dans le Génie des Procédés (systèmes experts, réseaux de neurones, machine learning) la modélisation de la connaissance par cette voie nécessite des évolutions dans les capacités de prédiction des caractéristiques du procédé d'un point de vue macroscopique. Ainsi, les points de vue présentés précédemment fournissent la connaissance nécessaire principalement pour le procédé lui-même mais moins pour l'organisation de la chaîne de transformation de la matière.

Dans ce cadre, les ontologies permettent de structurer la connaissance. En effet, les ontologies apparaissent comme le niveau de plus élevé d'explicitation de la connaissance en termes de construction et de détails. Elles ont pour objectif de représenter de manière normalisée les éléments de la connaissance (idée, chose, fait) avec un vocabulaire déterminé en vue d'un traitement informatique (Jepsen, 2009). Cette notion a fait l'objet de différentes conceptualisations. Nous nous arrêterons sur la définition de (Studer et al., 1998) qui définit et explique chaque terme clé en s'appuyant sur les travaux de (Borst., 1997; Gruber, 1993) :

*“An ontology is a formal, explicit specification of a shared conceptualization”*

Le terme conceptualisation fait référence à un modèle abstrait d'un phénomène dans la vie réelle pour lequel les concepts pertinents de ce dernier ont été identifiés. Le terme formel souligne que l'ontologie doit être lisible et compréhensible par un système informatique. Le terme explicite signifie

---

que les concepts utilisés et leurs contraintes sont clairement définis. Le terme partagé met en avant le fait que l'ontologie s'appuie sur des connaissances consensuelles acceptées par un groupe.

Les ontologies sont classées en différentes catégories selon leur dépendance et le niveau de point de vue adopté (Gómez-Pérez et al., 2006; Guarino, 1998) ainsi que le niveau de formalisation (Drame, 2014). Depuis la fin des années 90, différentes ontologies ont été développées en Génie des Procédés comme ONTOCAPE (Morbach et al., 2009) (ontologie généraliste de haut niveau) ou encore BaPrOn Ontology (Muñoz et al., 2010) pour les procédés batch, BiOnto (Trokanas et al., 2015) pour les bioraffineries et l'ontologie développée par (Zhou et al., 2018) pour les parcs-éco industriels. En dépit de leur pertinence pour nos travaux, ces ontologies sont peu, voire pas instanciées, ce qui ne les rend pas opérationnelles. Or, l'instanciation d'une ontologie existante demande un travail particulièrement conséquent. C'est pourquoi nous nous orientons vers une autre voie pour modéliser la connaissance de l'écosystème de la transformation de la matière.

#### IV.2.1.2 D'un point de vue de l'exécution du procédé

En considérant le procédé d'un point de vue de l'exécution, la connaissance nécessaire relève de l'organisation de la chaîne de transformation. Autrement dit, la finalité est d'assurer non seulement la bonne réalisation des activités de transformation mais également de définir les liens entre chacune d'entre elles.

Chaque procédé contient une succession propre d'opérations unitaires, assujetties à des conditions opératoires, selon le type de matière première et le produit final souhaité, c'est-à-dire une connaissance spécifique au procédé. Or, sur ce point, un type de modélisation unifié ou standardisé de la connaissance n'existe pas dans la littérature. Par ailleurs, il n'existe pas de recueil ou de référentiel regroupant l'ensemble de la connaissance sur les procédés existants en Génie des Procédés, sous forme de base de connaissances dédiée (ouvrage ou logiciel).

En l'absence de modélisation existante pour le type de connaissance visée en Génie des Procédés, tournons-nous vers à présent vers une approche plus générale.

Dans une optique de modélisation adoptant un positionnement « métier », nous nous sommes tournés vers l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM).

#### IV.2.2. Choix de l'Ingénierie Dirigée par les Modèles

Le Génie Logiciel, à l'instar du Génie des Procédés, fait face à des systèmes de plus en plus complexes (Jézéquel et al., 2012). Cette complexité est générée par les multiples sources de variabilités comme la personnalisation des besoins clients ou encore l'augmentation du volume de données (Galster et al., 2017). C'est dans ce contexte qu'apparaît l'Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) au début des années 2000. Ce paradigme vise à automatiser la conception et la validation des programmes, en plaçant le modèle au centre du processus de conception logicielle.

La proposition de l'IDM met l'accent sur la différenciation entre la logique métier et la mise en œuvre de l'implémentation technique. À ce sujet, le cadre de modélisation standardisé « Model Driven Architecture » (MDA) (Soley, 2000), développé par l'Object Management Group (OMG), est l'une des variantes spécifiques de l'IDM la plus connue et la plus utilisée (Favre, 2004). Ainsi, pour un même système, les pratiques sont homogénéisées et unifiées grâce à des standards à différents niveaux de développement concernant : les technologies d'implémentation (d'un point de vue des concepteurs), les plateformes d'implémentation (d'un point de vue des architectes d'entreprise) et les services d'entreprise selon les secteurs d'activités (d'un point de vue des utilisateurs). En effet, la modélisation

permet d'abstraire la réalité et d'aborder un système selon différents angles de vue. Dans cette volonté de modéliser le procédé, deux des trois principes recouvrant l'IDM (Combemale, 2008) attirent particulièrement notre attention.

Le **premier principe** concerne le lien entre le système et le modèle. Ce lien est appelé **representationDe** et est symbolisé par  $\mu$ . Sans préjuger de la qualité du modèle, ce dernier doit pouvoir se substituer au système qu'il représente. Ainsi, le modèle établit une approximation de la réalité en réalisant une sélection d'éléments et de paramètres. Autrement dit, un modèle doit pouvoir remplacer et répondre aux mêmes problématiques en lieu et place du système représenté (Minsky, 1965). Ce qui nous permet de représenter la réalité du système (l'écosystème de la transformation de la matière) avec un certain point de vue (point de vue métier).

Avant d'aborder, le **second principe**, il est nécessaire d'introduire la notion de **méta-modélisation**. La définition d'un langage de modélisation a pris la forme d'un modèle, appelé méta-modèle. Le méta-modèle joue un rôle majeur dans l'IDM. Il est défini par l'OMG comme :

*« Un type spécial de modèle qui spécifie la syntaxe abstraite d'un langage de modélisation. »*

De plus, (Seidewitz, 2003) introduit un aspect fondamental du méta-modèle : la validité. Cet aspect souligne qu'un modèle doit être conforme à son méta-modèle, ce qui mène au second principe. Ce principe lie le modèle et le langage utilisé pour le construire. Cette relation est appelée **estConformeA** et est symbolisée par  $\chi$ .

Par ailleurs, le méta-modèle est lui-même un modèle. Cette approche généralisée a été entérinée par l'OMG : c'est le méta-méta-modèle ou Meta-Object Facility (MOF) (Figure IV-4). Pour éviter d'avoir des niveaux d'abstraction sans limite, le principe de méta-circularité autorise à ce que le méta-méta-modèle puisse se définir lui-même et soit la base de définition de tous les méta-modèles, contenant différents niveaux d'abstraction. Il convient d'introduire la notion d'espace technique qui illustre l'articulation entre les différents niveaux d'abstraction. Il s'agit d'un espace de travail et un ensemble d'outils, de techniques et de compétences propres à un contexte de travail (Bézivin, 2004; Kurtev et al., 2002). Pour représenter ces différents niveaux d'abstraction, l'OMG propose de les hiérarchiser selon quatre niveaux de modélisation (Figure IV-4).

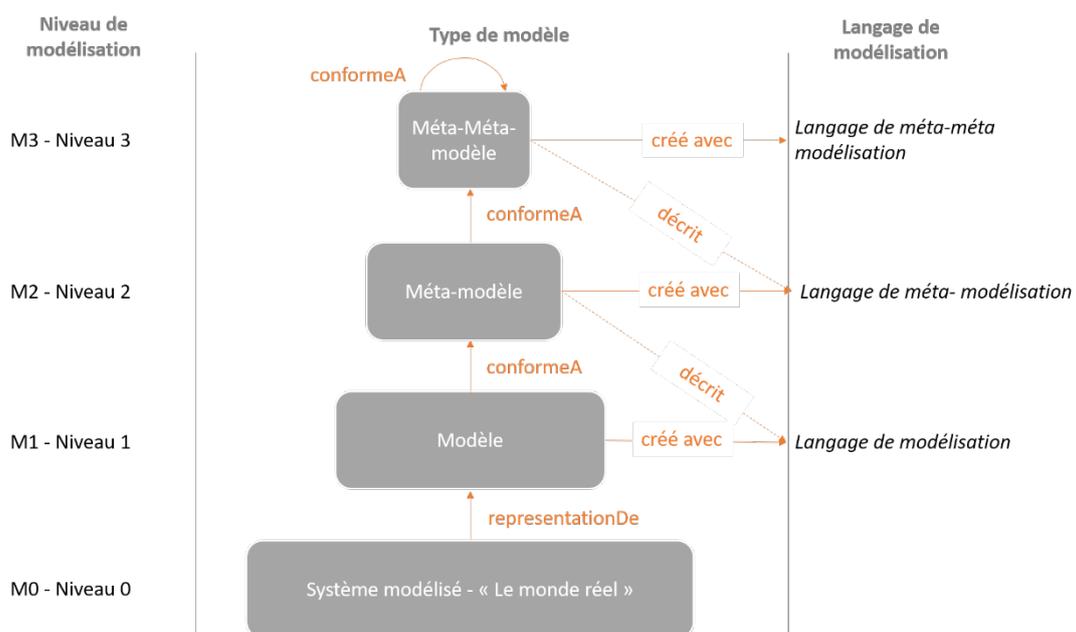


Figure IV-4 : Niveau de modélisation selon l'OMG adapté de (Bézivin, 2004)

L'IDM est un paradigme rarement employé dans l'Industrie du Procédé. Parmi, les rares travaux s'y rapportant, ceux de (Roth et al., 2017) abordent une approche multi-échelles orientée développement durable (stratégique, tactique et opérationnelle) pour le développement de projets énergétiques territoriaux. L'objectif est de faciliter la prise de décision des chargés de projets confrontés à une multitude d'informations et de nombreuses parties prenantes variées. Il est proposé de modéliser et d'évaluer ces processus de mise en œuvre de projets. Dans cette optique, l'IDM contribue à modéliser la connaissance du contexte socio-éco-environnemental du processus de développement, selon différents niveaux de granularité. Le méta-modèle développé s'appuie sur les quatre visions de l'architecture de l'entreprise intégrée issue de la norme ISO 19440 : architectural, structurel, fonctionnel et comportemental. Ces travaux qui intègrent des aspects économiques, sociaux et environnementaux sont particulièrement intéressants pour conserver une vision systémique du procédé. De plus, l'approche multi-échelles comprend les différents niveaux de granularité du système technique en jeu, de l'unité de production jusqu'à la chaîne logistique. Le recensement de toutes les parties prenantes permet de mettre en évidence leurs capacités d'action respectives et leur possible collaboration. Toutefois, le plus bas niveau de granularité observé dans ces travaux (d'un point de vue système technique) ne permet pas d'appréhender la dynamique d'exécution du procédé. Ce qui explique pourquoi nous ne nous appuyons pas sur ce modèle.

La section suivante présente la modélisation de l'écosystème du procédé basée sur l'IDM.

### IV.3. Modélisation de la connaissance de l'écosystème

La construction de la chaîne de transformation nécessite de décrire un processus de collaboration générique. Cela requiert de rassembler les connaissances pertinentes concernant l'environnement la situation collaborative (Figure IV-5).

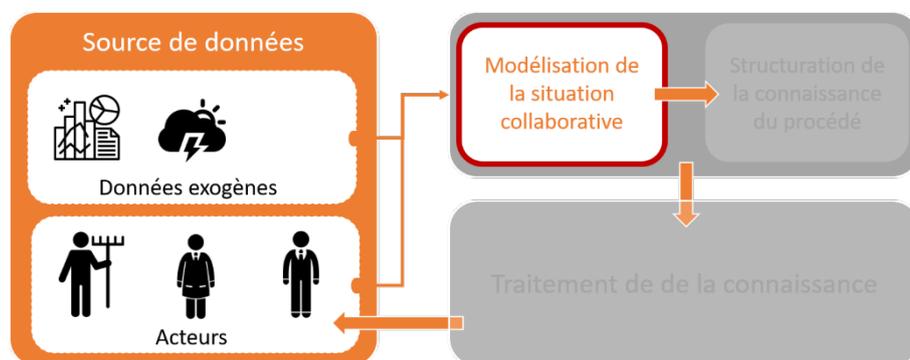


Figure IV-5 : Vue de notre cadre méthodologique centré sur la modélisation de l'environnement de la collaboration

#### IV.3.1. Modélisation de la connaissance de la collaboration

##### IV.3.1.1 Cadres existants spécifiques à un domaine métier

En ce qui concerne les chaînes logistiques, le modèle SCOR (Supply Chain Operation Reference) (Stewart, 1997) fournit un modèle de référence pour décrire, mesurer et évaluer les configurations des chaînes logistiques, et plus particulièrement des flux, à trois niveaux de détails de processus : le type, le niveau et la décomposition. En dépit de cette représentation détaillée couplée à la création d'indicateurs de performance pertinents, le modèle SCOR n'est pas suffisamment flexible pour l'objectif que nous poursuivons. En effet, il ne tient pas compte des incertitudes (en termes de demande, d'offre et d'approvisionnement de biomasse) de la chaîne de traitement de la matière et de la diversité des procédés possibles. En outre, cette méthode implique que la chaîne logistique soit déjà existante et

suppose que les acteurs concernés ont déjà été sélectionnés. Au contraire, en apportant de l'agilité, la chaîne de transformation de la matière sera déduite en fonction des caractéristiques du gisement de biomasse identifiée, d'une opportunité identifiée, des acteurs et de la disponibilité de leurs services. Elle s'établira dans le périmètre d'un territoire donné.

Les travaux de (Hawryszkiewicz, 2005) ont permis de développer un méta-modèle collaboratif spécifique aux applications informatiques pour les organisations qui soutiennent les collaborations. Dans la même lignée, une autre approche spécifique, développée dans le projet européen CORENET, est le modèle CoRenet Reference Model (CoRM) (Fornasiero et Zangiacomi, 2013). Il a pour but d'aider les Petites et Moyennes Entreprises (PME), du secteur du textile et de l'habillement, à définir un réseau d'approvisionnement collaboratif pour une production personnalisée grâce à un modèle de référence. Les cadres de modélisation précités, spécifiques à l'ingénierie logicielle et l'industrie du textile ne sont pas destinés à être transposés ou étendus à un autre domaine d'activités, comme la transformation de la matière.

Les travaux de (Ferrada et Camarinha-Matos, 2019) proposent le cadre de modélisation « Collaborative EMotion modelling framework » (C-EMO) pour conceptualiser les émotions des acteurs d'un réseau de collaboration. Cette approche « d'inspiration humaine » participe à renforcer et à pérenniser les réseaux collaboratifs en prévenant la gestion des conflits, les problématiques de gouvernance et de management au sein des réseaux de collaboration. Même si ce modèle est toujours en cours de développement, il est destiné à être utilisé dans différents domaines métier. Ce modèle est développé pour des collaborations de type Virtual Breeding Environment (VBE) où la coopération entre les organisations est sur le long terme. Or, dans notre cas, il s'agit davantage d'une collaboration de courte durée saisissant des opportunités, au fur et à mesure qu'elles se présentent. En outre, le C-EMO spécifie le réseau collaboratif en mettant en lumière les compétences de ses acteurs. Par conséquent, cette démarche ne permet pas de caractériser un procédé et son environnement.

À défaut de modélisation de la collaboration spécifique à l'industrie de procédés, il est intéressant de monter en abstraction pour explorer des modèles de collaboration génériques. Leurs capacités de transformation et d'adaptation aux spécifications de la collaboration seront particulièrement observées.

#### IV.3.1.2 Cadres génériques existants

Le modèle de référence ARCON (A Reference model for Collaborative Network) (Luis M. Camarinha-Matos et Afsarmanesh, 2008) est une base de modélisation générique pour représenter les entités et leurs relations au sein d'un réseau complexe de collaboration d'organisations. Ce modèle est structuré comme un cube sur trois dimensions. Il détermine les aspects de la collaboration, son cycle de vie, ses caractéristiques endogènes et exogènes (composants structurels du réseau, ressources, opérations de base, gouvernance du réseau de collaboration) et les niveaux de modélisation de la collaboration (une couche générale, une couche spécifique, une couche de modélisation de la mise en œuvre). Il a été utilisé et étendu à des domaines tels que le secteur agroalimentaire (Macedo et al., 2012) et plus récemment dans le domaine de l'accompagnement et de l'aide aux personnes âgées dépendantes (Baldissera et Camarinha-Matos, 2016). Ce modèle est associé à une collaboration à long terme où la collecte de données peut prendre plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Cependant, une plus grande réactivité est nécessaire pour les systèmes productifs.

Dans leurs travaux (Chavarría-Barrientos et al., 2015) ont développé un modèle de référence intitulé Smart x Sensing reference model (S2-RM) concernant l'entreprise intelligente. Il est présenté comme un réseau d'organisations collaboratives selon quatre points de vue : entreprise (modèle d'affaire), information (collecte et gestion des données, de l'information et de la connaissance),

---

informatique et ingénierie (compétences clés de la collaboration et le système de distribution et d'interopérabilité) et technologique (technologies qui va supporter les systèmes du réseau collaboratif). Cette modélisation s'appuie sur le standard ISO/IEC 10746 - Reference Model of Open Distributed Processing (RM-ODP). L'utilisation des différents diagrammes UML du modèle S2-RM (cas d'utilisation, de paquetage, séquence, de machine d'état, d'activité, de déploiement et de classe) couvre la fonctionnalité de chaque point de vue. Bien que ce cadre de modélisation représente les différents besoins du réseau collaboratif aussi bien sur les aspects fonctionnels que structurels, il ne prend pas en compte la modélisation de l'écosystème. De plus, la réalisation des diagrammes UML peut s'avérer longue. Or comme précisé précédemment, la collaboration entre les différents partenaires doit pouvoir être modélisée puis rendue effective dans des délais parfois exceptionnellement très courts compte-tenu de la périssabilité de la matière organique.

Les travaux de (Fayoumi, 2016) s'inscrivent dans le cadre du paradigme des réseaux de production collaboratifs (Collaborative Manufacturing Network CMN). Ces travaux développent un cadre de modélisation outillé pour la conception et l'analyse des CMN afin de mieux comprendre leur complexité et leur évolution dans le temps, en s'appuyant sur deux concepts. Le premier est la modélisation d'entreprise. Elle permet de comprendre le fonctionnement de l'entreprise en représentant tout ou partie des activités des processus mis en jeu, à un niveau global mais aussi à un niveau détaillé. Les activités de l'entreprise peuvent être décrites selon leurs objectifs, leurs structures, leurs fonctions, leurs évolutions et leurs relations avec l'environnement (Doumeingts et Ducq, 2001). Le second est la théorie de l'écosystème. D'un point de vue économique, l'écosystème est considéré ici comme une communauté d'acteurs qui interagissent et s'influencent mutuellement en fonction de leurs activités. De plus, selon (Jacobides et al., 2018), la prise en compte de l'écosystème favorise la modularité de la collaboration. Les travaux ont consisté à réunir ces deux concepts par une première méta-modélisation conceptuelle. Il en a découlé un second cadre de modélisation qui se concentre sur les aspects structurels, comportementaux et fonctionnels de l'écosystème. Toutefois, ce cadre suppose que le réseau collaboratif soit déjà créé. De plus, dans ces travaux, le méta-modèle se concentre davantage sur la caractérisation des ressources d'entreprise, la stratégie de l'entreprise, la nature de l'entreprise, ses objectifs et son écosystème et non sur ses processus.

Récemment, les travaux de (Semar-Bitah et Boukhalfa, 2019) proposent également un cadre de modélisation pour la description et la conception de réseaux collaboratifs inter-organisationnels. Ces travaux prennent en compte des approches développées par des auteurs comme (Rajsiri et al., 2010) au sujet d'un système de gestion à base de connaissances ou encore (Saib et al., 2005) avec l'analyse de la collaboration des processus d'entreprise. Le méta-modèle qui en découle décrit le système collaboratif et les interactions entre les partenaires. Il s'appuie sur trois aspects : la collaboration (le type de structure, le type de réseau collaboratif, la typologie de la collaboration), l'organisation (le type d'organisation impliqué, les ressources, la présentation du partenaire, les relations avec les autres partenaires) et le processus collaboratif (les activités, les événements, les scénarios). Ce méta-modèle est particulièrement complet au niveau des concepts décrivant les collaborations inter-organisationnelles. Il permet une caractérisation fine des processus de collaboration. En revanche, il ne prend pas en compte l'écosystème.

Comme le méta-modèle générique précédent, le méta-modèle CORE (Bénaben et al., 2016) présenté en Figure IV-7, vise à abstraire les concepts et leurs relations liés à toute situation de collaboration inter-organisationnelle. Ce méta-modèle est organisé en couches et fournit une base générique (le CORE) qui, si nécessaire, peut être spécialisée pour un domaine d'activité ou un domaine spécifique (les couches thématiques). Le méta-modèle CORE a déjà été déployé avec succès dans différents domaines tels que la gestion de crise (Fertier et al., 2019), les échanges (Montarnal et al., 2018). Ces applications ont en commun de nécessiter une réponse mesurée, réactive et adaptée dans des délais pouvant être réduits. Il est structuré autour de quatre grandes familles de concepts : le contexte (l'environnement collaboratif), les partenaires (les acteurs de la collaboration), les objectifs (la

cible de la collaboration) et la performance (évaluation de la collaboration à partir d'indicateurs clés de performance). Cette représentation permet de collecter facilement des données concernant les processus et de rassembler les caractéristiques d'un écosystème, même dans un contexte incertain. Dans cette perspective, le méta-modèle CORE paraît particulièrement pertinent et cohérent pour notre cas. Il offre d'une part la possibilité de le spécifier pour le domaine métier relatif à l'industrie de procédé, tout en pouvant représenter l'environnement du procédé et le procédé lui-même.

Les méta-modèles présentés précédemment ont été synthétisés dans le Tableau IV-1. Topologie : P2P : Pair à Pair, CHA : Chaîne, ETO : Etoile, GRI : Grille  
Partage : COM : Communication, COOR : Coordination, COOP : Coopération, COLL : Collaboration, FUS : Fusion  
Perspective : CT : Accord Court Terme (un projet), MT : Accord Moyen Terme (programme), LT : Accord Long Terme (Série de programme)

Auteur, Année	Type de modèle	Intitulé modèle	Concepts clés	Prise en compte de l'écosystème	Caractéristiques de la collaboration supportées par le modèle		
					Topologie	Partage	Perspective
(Luis M. Camarinha-Matos et Afsarmanesh, 2008)	Conceptuel	ARCON (A Reference model for Collaborative Network)	Cycle de vie Caractéristiques endogènes et exogènes Types de modélisation	Oui		COLL	
(Chavarría-Barrientos et al., 2015)	Diagrammes UML	Smart x Sensing reference model (S2-RM)	Stratégie Performance Processus Technologies	Non	P2P CHA	COLL	CT
(Fayoumi, 2016)	Méta-modèle	Collaborative Manufacturing Network (CMN)	Ecosystème Exigences Ressources	Oui		COLL	
(Bénaben et al., 2016)	Méta-modèle	CORE	Contexte Partenaire Objectif Performance	Oui	P2P CHA ETO GRI	COLL	CT M T LT
(Semar-Bitah et Boukhalfa, 2019)	Méta-modèle	Collaboration Metamodel	Participant Objectif commun Sous-objectif Rôle Activité Topologie Ressource Coordinateur du processus Processus d'abstraction Sous-processus	Non	P2P CHA ETO GRI	COM COOR COOP COL FUS	CT M T LT

Tableau IV-1 : Récapitulatif des modèles de collaboration génériques selon les caractéristiques de la collaboration définies par (Montarnal, 2015)

### IV.3.1.3 Éléments pertinents pour une transposition à l'industrie de procédés

Suite à ce rapide aperçu de la modélisation des réseaux de collaboration, et en l'absence de l'existence de modélisation de la collaboration spécifique au Génie des Procédés, le méta-modèle CORE apparaît comme le méta-modèle le plus pertinent pour soutenir la collecte d'informations sur l'écosystème du procédé.

Il représente la collaboration à un haut niveau d'abstraction. Il contient l'ensemble des concepts nécessaires pour la modélisation de la situation collaborative. Suffisamment générique, ce méta-modèle n'a pas été modifié. Ce dernier permet de décrire la situation collaborative en répondant à cinq questions :

1. QUI (qui sont les partenaires de la collaboration),
2. POUR QUOI (quel est l'objectif de la collaboration),
3. OÙ et COMMENT (à quel endroit et dans quelles circonstances se tient la collaboration),
4. COMBIEN (quel est le niveau de performance de la collaboration),
5. QUELLE DUREE (quels sont les aspects temporels de la collaboration).

De plus, ce méta-modèle a l'avantage de pouvoir être spécifié au domaine métier de la collaboration considérée comme présenté sur la Figure IV-6. C'est pourquoi, le méta-modèle CORE (Figure IV-7) sera donc utilisé comme support de développement du méta-modèle de l'écosystème de la transformation de la matière.

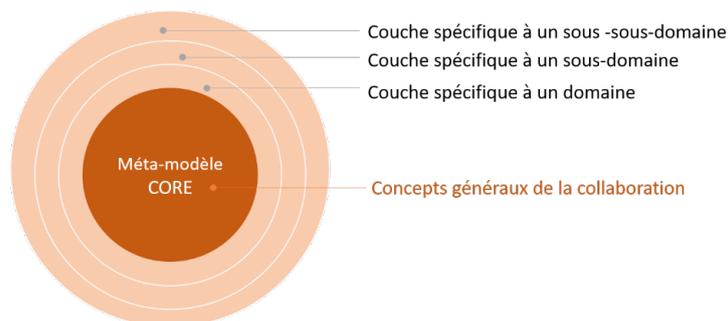


Figure IV-6 : Structure du méta-modèle de collaboration adapté de (Bénaben, 2012)

Le méta-modèle CORE contient plusieurs concepts en interaction.

L'environnement (*Environnement*) dans lequel se tient la collaboration est déterminé par des composantes physiques (*Composant de l'environnement*) et des composantes abstraites (*Caractéristique*). De cette caractérisation de l'environnement peuvent émerger des opportunités ou des menaces (*Opportunité / Menace*) qui impactent la collaboration et peuvent être concrétisées par la survenue d'un phénomène (*Fait*). L'ensemble de ces éléments peuvent être concernés par l'objectif (Objectif) de la collaboration.

L'objectif peut être composé de sous-objectifs. L'objectif visé est commun à l'ensemble du réseau collaboratif (*Réseau collaboratif*) qui implique différents partenaires (*Partenaire*). Chaque partenaire fournit ses capacités disponibles (*Capacité*), c'est-à-dire ce qu'il peut apporter, pour contribuer à l'objectif. Un ensemble de capacités peut être regroupé en modèles (*Modèle*). Ces modèles peuvent se référer à des processus déjà existants et définis. Chaque capacité a besoin de ressources (*Ressource*) pouvant être humaine, matérielle et/ou financière pour la bonne prise en charge des règles de réalisation de la capacité (*Instruction*). De plus, chaque capacité nécessite un flux entrant et génère un flux sortant (*Flux*). Sur ce dernier élément, le flux sortant peut être une instruction ou une ressource. Un flux peut contenir plusieurs flux. Le médiateur (*Médiateur*) est un partenaire spécifique qui a pour



base de ces données, un modèle de l'écosystème peut être réalisé, permettant l'identification d'un gisement, d'une demande mais aussi d'acteurs et de services inscrits dans un territoire donné. Les connaissances vont permettre d'alimenter les mécanismes de déduction du procédé de traitement de la biomasse. Chaque instanciation du méta-modèle fournit un modèle à un instant donné, comme le serait une photographie de l'environnement. Cette instanciation est faite tout au long de l'exploitation du procédé (i.e. à plusieurs instants) ce qui permet de détecter les évolutions de l'écosystème et de réagir. Ce méta-modèle souligne les aspects de réactivité et de détection de l'agilité.

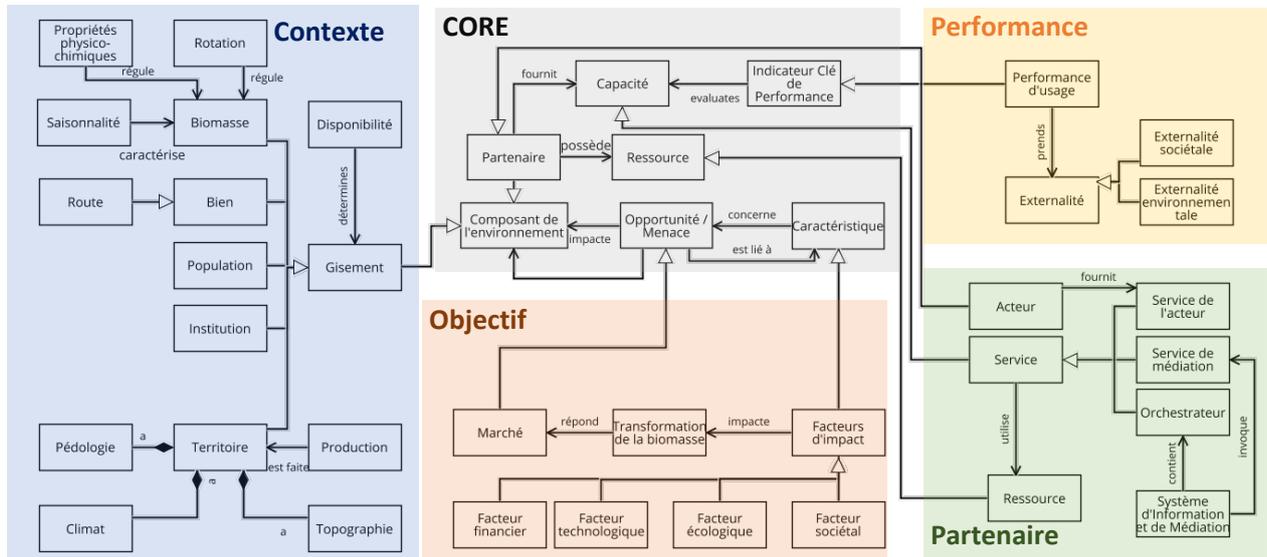


Figure IV-8 : Méta-modèle de la situation collaborative pour la transformation de la biomasse

### IV.3.2.1 La famille de concepts relative au contexte

La modélisation de la famille de concepts concernant le contexte est présentée dans la Figure IV-9.

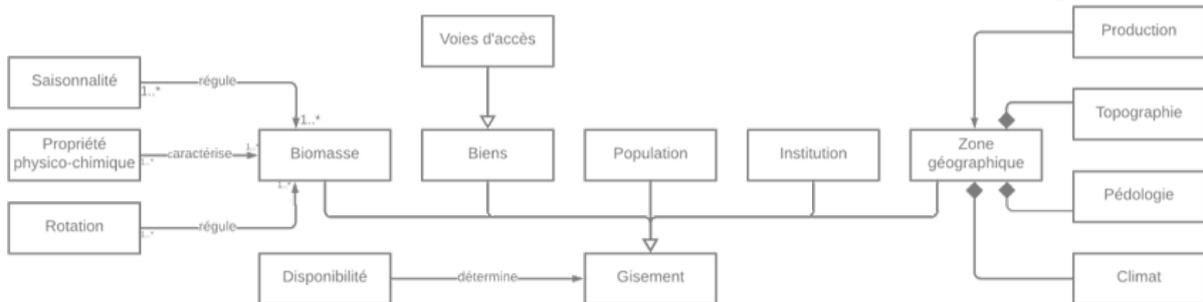


Figure IV-9 : Famille de concepts relatif au contexte du méta-modèle de l'environnement du procédé

Le contexte détermine l'environnement de la collaboration. Le gisement est l'élément central du contexte. Prenant en compte la biomasse, une aire géographique, des biens, une population et des institutions, il hérite des attributs des composants de l'environnement du méta-modèle CORE.

### Gisement

Le gisement s'inscrit dans une filière ou un secteur comme celui du bois ou de l'agriculture. Selon l'(AREC, 2009), le concept de gisement peut être vue selon son niveau de disponibilité (Figure IV-10):

- Le gisement biologique brut : la totalité de matière organique disponible sur le territoire
- Le gisement inexploitable : matière organique devant retourner au sol ou inaccessible
- Le gisement mobilisable : la différence entre le gisement biologique disponible et le gisement inexploitable

- Le gisement mobilisé : la matière organique déjà engagée dans un processus de valorisation ou stockée
- Le gisement supplémentaire mobilisable : la différence entre le gisement mobilisé et le gisement mobilisable. Il est sujet aux variations et contraintes économiques des marchés.

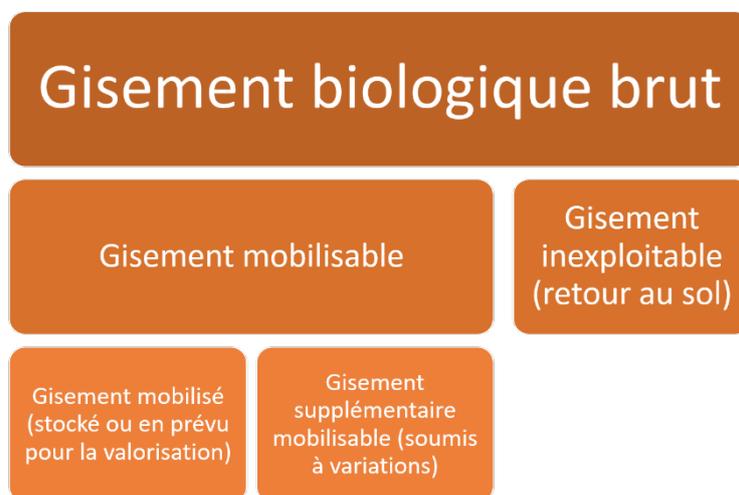


Figure IV-10 : Différents types de gisements de biomasse de (AREC, 2009)

La notion de disponibilité n'est pas apparente, mais demeure un aspect essentiel du gisement. En effet, la totalité de la biomasse produite ne peut être récoltée et traitée. Le retour au sol est une pratique rendue obligatoire pour les producteurs de biodéchets produisant plus de dix tonnes par an avec la loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (République Française, 2015). Le retour au sol des produits organiques fait l'objet de procédures strictes une fois l'innocuité du biodéchets à l'égard de l'homme, des animaux et de l'environnement prouvée. Dans le méta-modèle proposé, la disponibilité représente la fraction de la biomasse qui sera traitée. Elle est alors essentielle dans le déclenchement du processus de collaboration, dans la mesure où elle permet le lancement des opérations de transformation. Autrement dit, si la biomasse est disponible dans quantités et/ou volumes suffisants, il est possible de la valoriser et ainsi de concevoir la chaîne de transformation, sous certaines conditions spatio-temporelles et logistiques.

### Biomasse

Le gisement dispose de biomasse qui est composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine.

### Propriétés physico-chimiques

La biomasse, matière organique et végétale vivante, se caractérise par des propriétés chimiques (composition chimique en éléments simples : C, H, O, N, S, Cl) (Hornung, 2014) et physiques (humidité, forme, taille, densité, porosité, type de conditionnement, ...), déterminantes pour en établir sa qualité selon les produits attendus.

### Saisonnalité

La saisonnalité caractérise la capacité de la biomasse à être produite sur une ou plusieurs périodes temporelles. Elle peut s'établir selon un calendrier organisant les travaux à effectuer afin d'optimiser sa production et sa récolte (exemple : calendrier des activités agricoles dans l'agriculture). Les variations saisonnières de la production impliquent un changement dans l'utilisation des ressources (matérielles, humaines) en fonction des périodes de pointe et de creux des activités. Cet aspect amène à la notion de rotation des cultures définie comme une diversification des cultures par l'inclusion de cultures intermédiaires. Cette pratique étant un enjeu fort de la mise en œuvre d'une agriculture

---

durable, selon la Communauté Européenne (Kollas et al., 2015), il est important de la prendre en compte.

### **Aire géographique**

Le gisement se situe sur un espace géographique délimité. Dans notre cas, l'aire géographique est fixée à l'intérieur d'un rayon prédéfini selon l'étude du territoire. D'un point de vue socio-économique, le dynamisme territorial représente un enjeu fort pour les régions françaises et notamment pour les communes rurales. Une des sources de stimulation peut s'orienter vers la mise en place de collaborations intra-territoriales ayant pour effet un renforcement de collaborations existantes ou la création de nouvelles. Même si les métiers de la transformation de la matière relèvent du même domaine d'activité, il n'en demeure pas moins une grande diversité, en fonction du procédé considéré.

### **Bien**

Le gisement dispose de biens, c'est-à-dire d'installations existantes produites par l'homme nécessaires à son bon fonctionnement. Cela intègre les différents types de voies d'accès tels que les routes, les chemins, etc.

### **Topographie**

L'aire géographique dispose d'un type topographique caractérisé par un type de terrain, un type de reliefs, etc.

### **Pédologie**

La pédologie constitue "la science qui étudie la genèse, la nature, la distribution et la possibilité d'utilisation des ressources du sol" (Djikerman, 1974). La restitution au sol de la biomasse permet d'améliorer les propriétés du sol (teneur en eau, teneur en matière organique, etc.) et ainsi de favoriser la réalisation des services écosystémiques<sup>4</sup>. Cette approche s'insère dans une logique visant d'une part à amender les sols en fournissant des éléments fertilisants présents dans les matières organiques et d'autre part à limiter les nuisances et pollutions causées par l'incinération et la mise en décharge des déchets d'origine organique.

### **Climat**

Le climat continue de jouer un rôle dans le façonnage de l'aire géographique. Il influence également directement le gisement via les phénomènes climatiques aléatoires et significatifs tels que les épisodes de sécheresse, de pluies abondantes, de vent, d'orage, de grêle, etc.

### **Population**

La population, quant à elle, regroupe la communauté publique au sens large (citoyens, associations, collectifs d'habitants). Cette dernière comprend les personnes physiques ou morales de droit privé (entité dotée d'une personnalité juridique). Elle joue un rôle prédominant dans l'acceptabilité sociale d'une chaîne de transformation de la biomasse, notamment dans la perception des nuisances (visuelle, olfactive, auditives, ...), surtout lorsque des habitations ou des établissements recevant du public se trouvent à proximité des étapes de transformation de la biomasse.

---

<sup>4</sup> Un service écosystémique correspond aux biens et services fournis par un écosystème (une forêt, un lac, une prairie, etc.) bénéficiant à la population humaine (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2019)

### Institution locale

Les institutions locales peuvent ainsi être motrices dans la mise en place de procédés agiles, de par leurs compétences territoriales. Il s'agit par exemple des collectivités territoriales (mairie, communauté d'agglomération, conseil départemental, conseil régional) ou encore des établissements publics (Chambre de Commerce et de l'Industrie, Établissement Public d'Aménagement). Jouant également un rôle dans l'acceptabilité sociale, elles sont à même de mettre en œuvre des mesures incitatives ou contraignantes (financièrement, opérationnellement, administrativement) à l'exploitation du gisement.

#### IV.3.2.2 La famille de concepts relative aux partenaires

La modélisation de la famille de concepts concernant les partenaires est présentée dans la Figure IV-11

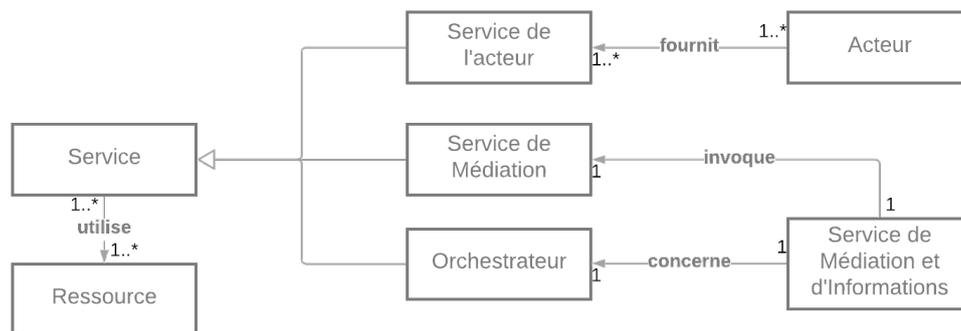


Figure IV-11 : Famille de concepts relative aux partenaires

Ce concept hérite du concept de partenaire du méta-modèle CORE. Les partenaires représentent le réseau collaboratif. Chacun d'entre eux est appelé un acteur. Chaque acteur participe de manière opérationnelle à la transformation de la matière en fournissant un ou plusieurs services basés sur des ressources (humaines, matérielles, etc.). L'ensemble de la collaboration est coordonné par un Système de Médiation et d'Information (MIS). Dans ce cas-là, le service est fourni par un acteur non humain.

### Service

Le Service est central dans notre approche d'agilité dans l'industrie de procédés. Le service hérite des attributs du concept de la capacité du méta-modèle CORE. Le service représente une prestation pour l'exécution d'une activité pouvant être réalisée par un acteur humain ou non humain.

### Acteur

Chaque acteur participe de manière effective à la transformation de la matière. Cette notion hérite du concept de partenaire du méta-modèle CORE.

### Service de l'acteur

Ce concept fournit des informations relatives à la capacité de l'acteur à effectuer une prestation de type « offre intégrée » (comprenant l'équipement, la connaissance, une assistance) pour une activité effectuée pour autrui possédant une valeur économique, en fonction de son expertise et de son niveau de connaissances. Le service de l'acteur hérite des caractéristiques du concept de capacité du méta-modèle CORE.

## Ressource

Le concept de ressource hérite du concept de ressource du méta-modèle CORE. Dans le cadre de la servicisation, il fournit des informations relatives à la capacité d'un acteur à fournir un service relatif à l'activité à réaliser sur la base de son expertise et de ses connaissances.

## Service de médiation

Dans le cadre de la collaboration, le service de médiation vise à faire l'interface entre les partenaires, de l'étape de collecte des données hétérogènes jusqu'à leur conversion en informations (Wiederhold, 1992). La médiation garantit les échanges entre les différentes activités du processus, au sens du système d'information.

## Orchestrateur

Le concept d'orchestrateur (appelé aussi médiateur) désigne un acteur spécifique de la collaboration. Il est défini par (Wiederhold, 1992) comme un module logiciel qui exploite des connaissances codées sur certains ensembles ou sous-ensembles de données afin de créer des informations pour une couche supérieure d'applications. De plus, l'orchestrateur joue un rôle clé dans le processus de prise de décision. Il représente la connaissance administrative et technique nécessaire à la création d'informations pour les modules de prise de décisions de l'utilisateur.

## Système d'information et de Médiation (MIS)

Le Système d'Information et de Médiation établit les relations et le partage d'information (d'un point de vue gestion des données) entre les services proposés par les différents acteurs. L'objectif est de garantir que les données collectées soient cohérentes avec l'objectif à atteindre (Mu et al., 2015).

### IV.3.2.3 La famille de concepts relative à l'objectif

La modélisation de la famille de concepts objectif est présentée dans la Figure IV-12.

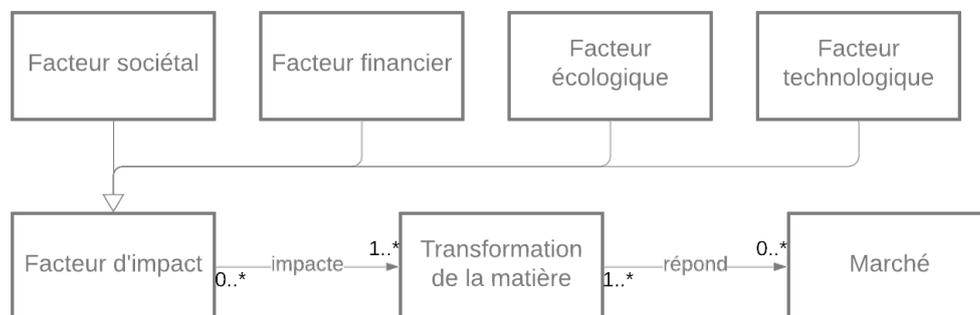


Figure IV-12 : Famille de concepts relatif à l'objectif

Le cœur du processus de collaboration repose sur l'objectif global de la transformation de la matière. Héritant du concept objectif du méta-modèle CORE, il détermine le développement et l'évolution (c'est-à-dire le cycle de vie) du processus de collaboration.

## Transformation de la biomasse

La transformation de la matière est la finalité de la collaboration, conditionnant ainsi le cycle de vie du processus collaboratif. La transformation de la biomasse répond aux besoins du marché. Elle peut être favorisée ou freinée par des facteurs d'impact d'ordre sociétal, financier, écologique ou encore technologique.

### Marché

L'objectif de transformation de la biomasse répond au marché qui établit l'offre et la demande, mais également les conditions de concurrence entre les parties prenantes.

### Facteur d'influence

L'objectif de la collaboration est soumis à des facteurs d'influence pouvant exercer un effet positif (une opportunité) ou un effet négatif (une menace) sur la collaboration. Ils héritent des caractéristiques intrinsèques du contexte, qui mettent en évidence les enjeux du fonctionnement de la chaîne de transformation de la matière. Les facteurs d'influence comprennent des paramètres relatifs à la durabilité (social, économique, environnemental) ainsi que les capacités d'évolution technique du système.

### Facteur sociétal

"Sociétal" est défini comme un terme qui se rapporte aux divers aspects de la vie sociale des individus, en ce qui constitue une société organisée. Ainsi, la création d'emplois, la valorisation de biomasse, l'enrichissement des sols, l'acceptation par la société (contestation, engouement), la perception des nuisances, la perception des risques (risque gaz, risque explosif, risque santé), les attentes de ce type de collaboration ou encore la proximité des installations de traitement sont susceptibles d'affecter l'organisation de la société.

### Facteur financier

Dans le cadre de la transformation de la biomasse, ce facteur intègre l'évolution des coûts liés aux procédés, à la maintenance des équipements ou encore aux différentes charges. Ce facteur prend en compte les dépenses de fonctionnement (Operating Expenses - OPEX) ainsi que les dépenses d'investissement (Capital Expenditure - CAPEX).

### Facteur écologique

Ce facteur comprend l'ensemble des modifications relatives à la relation entre les êtres vivants et leur environnement (gaz à effet de serre, évolution de la biodiversité, rejets ou encore gestion des déchets) pouvant altérer le processus de transformation de la biomasse.

### Facteur technologique

Ce facteur regroupe l'ensemble des innovations et évolutions relatives aux machines, procédés, méthodes et pratiques pouvant avoir des effets sur la transformation de la biomasse.

#### IV.3.2.4 La famille de concepts relative à la performance

La modélisation de la famille de concepts objectif est présentée dans la Figure IV-13.

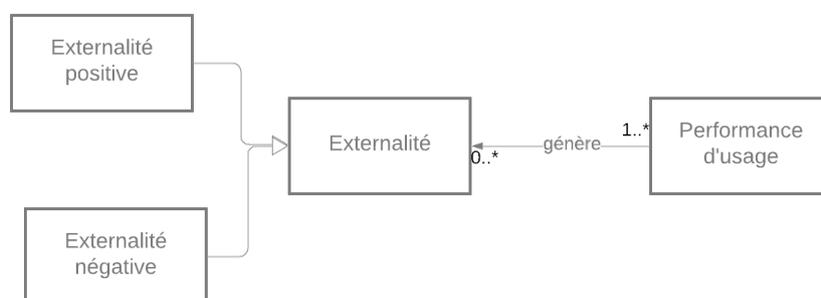


Figure IV-13 : Famille de concepts relatif à la performance

La performance de la collaboration hérite du concept Indicateur Clé de Performance du méta-modèle CORE.

## Performance d'usage

La mesure de la performance de la collaboration revient à évaluer la performance globale de la chaîne de transformation. Les Indicateurs clés de Performance pertinents, reposent non seulement sur la vente d'une performance d'usage (liée à un contrat basé sur le résultat) (ADEME et al., 2017) de chaque service rendu par les acteurs du réseau collaboratif, mais également sur le résultat global de la transformation de la matière.

## Externalité

Ces services rendus génèrent, sans contrepartie financière, des impacts économiques indirects, dits externalités positives (création d'emplois, développement économique du territoire, ...) ou négatives (pollution, destruction biodiversité, ...) relatives à l'environnement ou encore à l'organisation de la société.

### IV.3.3. Modélisation de la connaissance sur le procédé

Après avoir déterminé la représentation de l'environnement du procédé, l'organisation de la connaissance du procédé constitue la seconde étape de la méta-modélisation de l'écosystème du procédé. L'objectif est de proposer une méta-modélisation du procédé générique d'un point de vue métier dans l'optique de sa servicisation Figure IV-14.

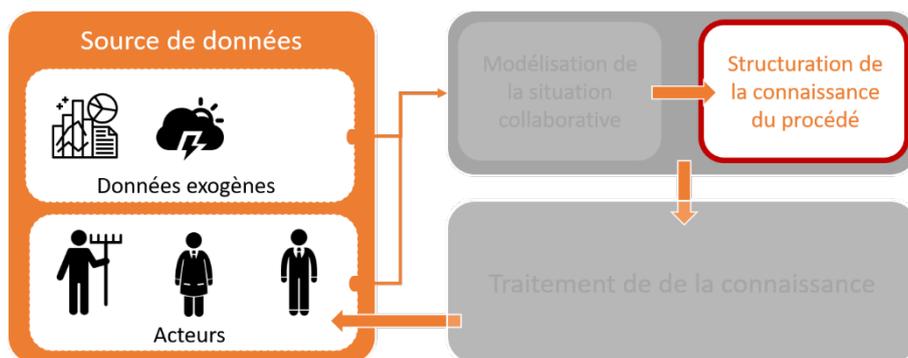


Figure IV-14 : Vue de notre cadre méthodologique centré sur la modélisation de de l'environnement de la collaboration

#### IV.3.3.1 Méta-modèles existants dans l'industrie de procédés

Dans l'industrie de procédés, la méta-modélisation s'inscrit principalement dans une volonté de capitaliser la connaissance d'un point de vue physique, chimique et des conditions opératoires lors des phases de conception. Pour y parvenir, les méta-modèles sont principalement mathématiques. (Kajero et al., 2017) les classent selon différents types : polynomiaux, gaussiens ou issus de l'intelligence artificielle pour des applications d'optimisation du procédé, d'amélioration de son pilotage, d'analyse de sensibilité ou de simulation. Sur ce dernier point, les travaux (Chuang et al., 2014) soulignent que la méta-modélisation est un outil permettant de diminuer le nombre de simulations dans les analyses concernant la mécanique des fluides dans un réacteur par exemple. Cela implique alors que le méta-modèle soit valide (Meckesheimer et al., 2002).

La méta-modélisation, dans une vision IDM, a été abordée pour la gestion de projet de conception de procédés (Figure IV-15). Les travaux de (Eggersmann et al., 2000) ont eu pour objectif d'informatiser les connaissances nécessaires des spécifications initiales à la conception technique finale. Ils estiment que ces connaissances sont souvent détenues de manière individuelle, alors même que les démarches collaboratives dans ce sens se multiplient. Par ailleurs, l'utilisation de ces connaissances et leur articulation s'avèrent complexes. Cette approche va dans le sens du développement d'un support

d'aide à la conception pour les services d'ingénierie. Un méta-modèle a été formalisé pour la conception des procédés, comme présentée dans la Figure IV-15.

Ce méta-modèle a été testé avec réussite sur un projet de conception d'un procédé de polymérisation. Toutefois, le niveau de granularité choisi ne satisfait pas nos besoins de modélisation de procédé en vue de la servicisation. En effet, le concept d'activité, tel qu'énoncé dans ces travaux ne fait pas référence au procédé en tant que tel mais à la tâche à accomplir pour mener à bien la conception du procédé.

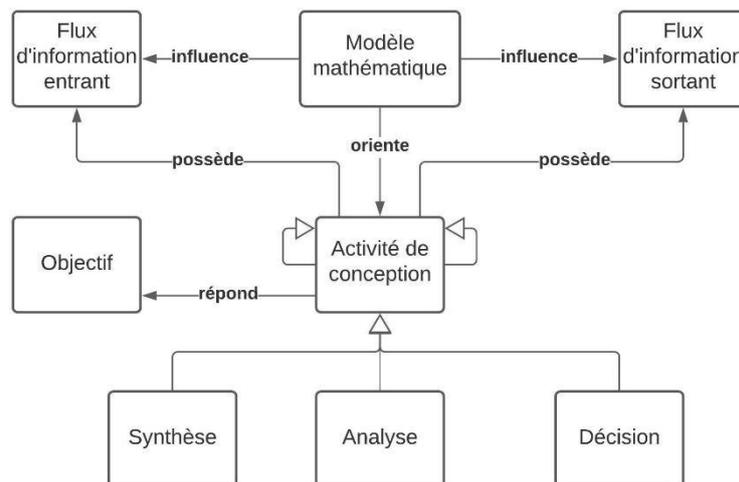


Figure IV-15 : Méta-modèle pour la gestion de projet de conception d'un procédé chimique selon (Eggersmann et al., 2000)

#### IV.3.3.2 Modélisation de la connaissance sur le procédé

Les connaissances minimales requises pour le procédé sont, pour chaque étape principale (respectivement chaque opération unitaire) : l'intrant (la matière première, le produit intermédiaire) ; le sortant (le produit intermédiaire, le produit final), les conditions opératoires. Étant donné qu'il n'existe pas de base de connaissances organisant les connaissances sur les procédés existants pour la transformation de la matière première au niveau d'abstraction requis, un méta-modèle (Figure IV-16) est proposé à cette fin, basé sur le langage standardisé de la méta-modélisation. Comme énoncé précédemment, cette modélisation offre un degré de détail pertinent en ce qui concerne les besoins mentionnés ci-dessus.

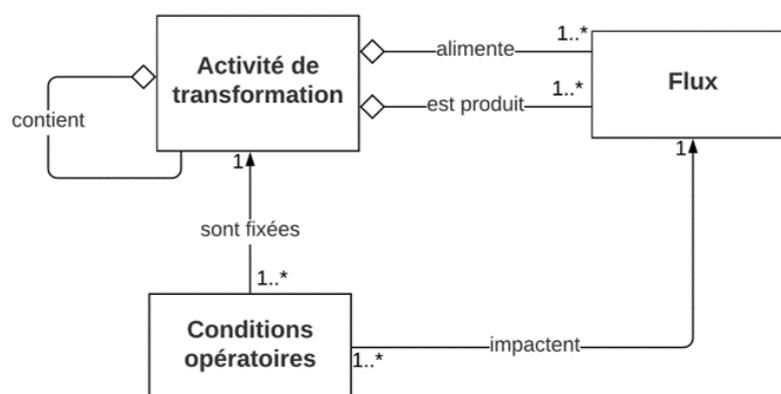


Figure IV-16 : Méta-modèle pour la structuration de la connaissance du procédé

Cette représentation de la connaissance permet de structurer une base de connaissances sur les procédés. Un exemple d'implémentation technique de cette base sera détaillé dans le chapitre V. Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur les connaissances relatives à l'enchaînement des opérations. Néanmoins, à terme, il sera possible d'y intégrer des connaissances supplémentaires moyennant un enrichissement du méta-modèle. Cette base de connaissances peut également intégrer des connaissances supplémentaires concernant l'adéquation entre les services proposés par les acteurs et le procédé requis comme le proposent (Montarnal et al., 2018) dans leurs travaux concernant les industries manufacturières. Chaque procédé ainsi que les opérations unitaires qui le composent sont considérés comme un objectif, une finalité qu'un service d'acteur (ou un ensemble de services d'acteurs) remplira. De cette façon, les connaissances requises sur les services sont structurées et prêtes à être utilisées pour déduire un processus de transformation collaboratif pertinent.

Le méta-modèle proposé diffère d'un actigramme par le type d'informations qu'il contient. En effet, les activités de contrôle ou encore les mécanismes de contrôle ne sont pas représentés.

#### IV.3.4. Méta-modélisation de la connaissance du procédé appliquée à la biomasse

L'instanciation du méta-modèle proposée dans la Figure IV-17 est basée sur la représentation du diagramme SADT-IDEFO. Cette modélisation offre un degré de détail pertinent en ce qui concerne les besoins pour la servicisation du procédé. En effet, l'analyse SADT-IDEFO organise les flux des opérations unitaires pour donner une vision globale du procédé. Puis, par une analyse fonctionnelle des niveaux successifs, elle précise plus finement chaque activité de transformation du système. La finesse de cette description est directement liée aux données disponibles dans la littérature. Un exemple d'illustration est présenté dans Figure IV-17.

Dans cet exemple, le procédé A1 peut se décomposer en quatre activités A11, A12, A13 et A14. Les activités A11 et A14 peuvent à nouveau se décomposer respectivement en activités. L'activité A11 se découpe en trois activités A111, A112 et A113. Quant à l'activité A14, elle peut en découper en deux activités A141 et A142. Enfin, l'activité A112 peut être rapportée à l'exécution de deux activités A1121 et A1122.

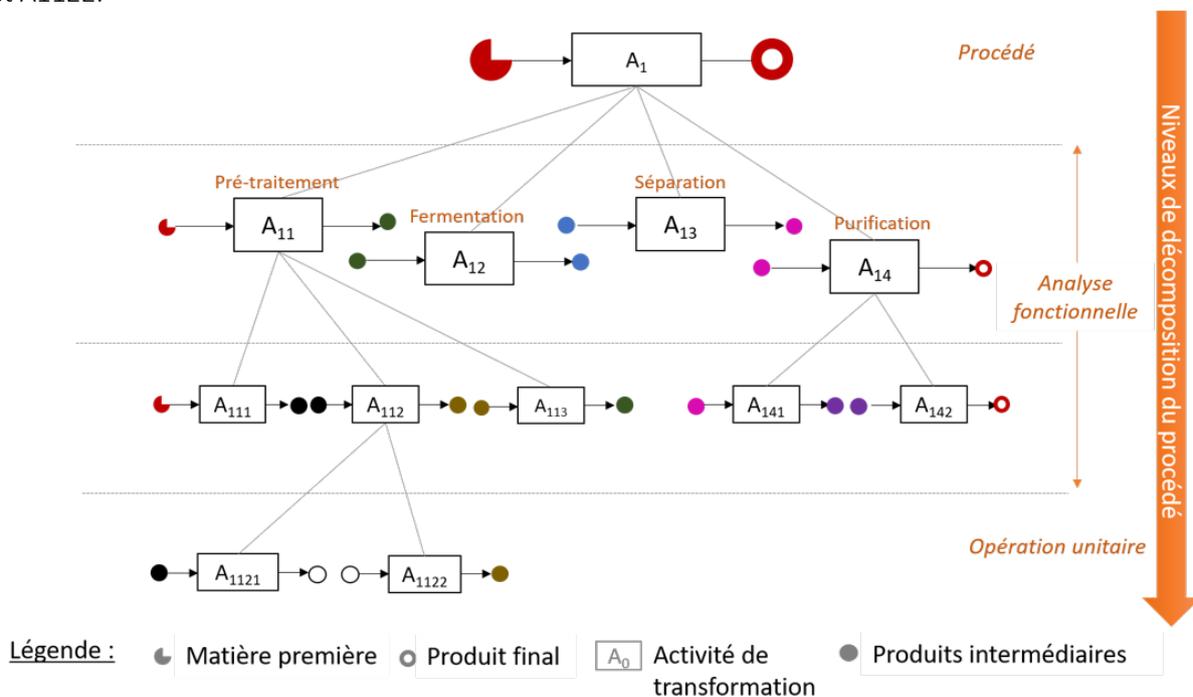


Figure IV-17 : Illustration de la décomposition d'un procédé

Chaque activité peut alors être réalisée par un service d'acteur. Avec cette représentation de la connaissance du procédé, les connaissances requises sur les services sont structurées et prêtes à être utilisées pour déduire une chaîne de transformation pertinente vis-à-vis de l'objectif poursuivi

La transformation de la biomasse lignocellulosique peut être considérée comme une chaîne composée de quatre grandes étapes : (i) prétraitement ; (ii) conversion ; (iii) séparation ; (iv) purification. Le prétraitement de la biomasse est crucial pour les phases qui lui succèdent. En effet, au cours de cette étape, la structure de la biomasse est modifiée pour rendre les sucres accessibles à partir de la lignine, de la cellulose et de l'hémicellulose. La phase suivante est la conversion de la biomasse en éléments constitutifs (sucres en C2 à C6). Elle peut être réalisée de différentes manières : chimique, biochimique, thermochimique. Ces éléments constitutifs sont les bases pour concevoir des bioproduits, de la bioénergie et des biocarburants. Enfin, la séparation et la purification permettent d'affiner la qualité du produit pour l'adapter aux besoins du client. Chaque grande étape se décompose en opérations unitaires qui sont spécifiées en fonction des caractéristiques de la biomasse entrante et des bioproduits visés comme illustré dans la Figure IV-18.

Illustrons nos propos avec la représentation de la connaissance du procédé de GNC (Gaz Naturel Compressé) par méthanisation à partir de déchets verts, à partir des travaux de (C. Chen et al., 2016; Sun et al., 2015; Ullah Khan et al., 2017). Le procédé de fabrication du GNC comprend les étapes de : dépulpage, de réduction en bouillie, de digestion anaérobie, d'extraction du méthane, de raffinage relatif aux normes pour une mise sur le réseau et de compression en vue de la distribution du GNC. Parmi ces étapes, le raffinage du biométhane peut-être décomposé en sous activités : la désulfuration, la décarbonatation et la déshydratation.

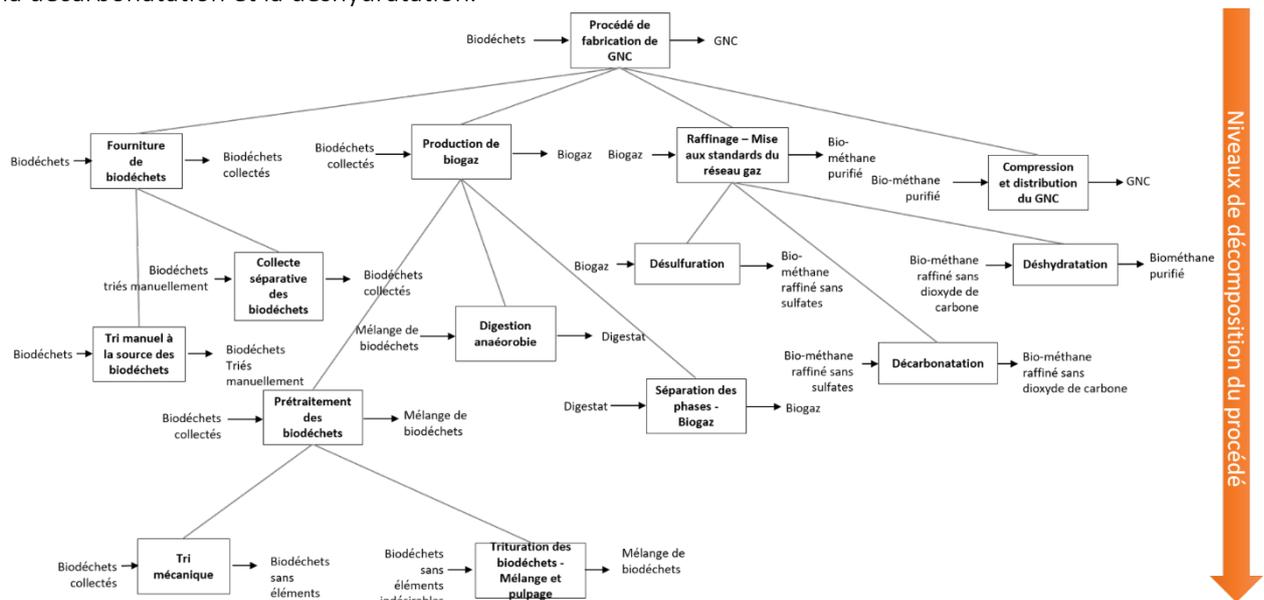


Figure IV-18 : Description du processus de biométhanisation à partir d'une instance du méta-modèle du procédé

---

## IV.4. Conclusion

Pour la mise en œuvre de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière, ce chapitre répond à la nécessité de la description de son écosystème, notamment en vue de sa servicisation. Cette description de l'écosystème passe par la modélisation et la structuration de la connaissance, qui supporte et articule la construction de la collaboration.

À l'issue d'une étude bibliographique, le méta-modèle CORE s'avère le plus pertinent pour la modélisation de l'environnement collaboratif. Générique à toute collaboration, il a déjà été utilisé dans d'autres domaines métier avec succès. Il permet une modélisation avec un haut niveau d'abstraction, en tenant compte du contexte de la collaboration. De plus, ce méta-modèle offre la possibilité de se spécifier dans un domaine métier. Il servira de support de développement du méta-modèle de la transformation de la biomasse. Ainsi, les concepts du méta-modèle de transformation de la biomasse vont hériter des concepts du méta-modèle CORE.

Chaque instanciation du méta-modèle fournit un modèle à un instant  $t$ . Cette instanciation est faite tout au long de l'exploitation du procédé ce qui permet de détecter les évolutions.

La connaissance requise concerne l'environnement du procédé. Il s'agit de caractériser la situation collaborative au travers des interactions entre les différents paramètres du territoire considéré. Nous avons déterminé que la connaissance requise à ce niveau est liée aux contraintes et aux enjeux du territoire. D'une part, elle s'appuie sur des données relatives au contexte du territoire (enjeux, contraintes, caractéristiques spatiales). D'autre part, elle repose sur des données relatives au réseau d'acteurs ainsi que sa capacité à proposer des services vis-à-vis des besoins du territoire. La connaissance requise s'adresse dans le même temps au procédé en tant que tel. À ce niveau, nous avons mis en évidence qu'une vision fonctionnelle du procédé faciliterait sa servicisation. La connaissance nécessaire englobe les exigences relatives à la bonne exécution du procédé. Elle repose sur des données concernant l'enchaînement des différentes étapes de transformation, les flux initiaux, finaux et intermédiaires ainsi que les conditions opératoires.

Dans cette perspective, en l'absence d'une modélisation existante concernant les réseaux collaboratifs pour la transformation de la matière, nous avons développé un méta-modèle qui permet de soutenir la collecte des données et la structuration de la connaissance de la situation collaborative en fonction de l'environnement, des partenaires, des objectifs et des performances. Puis, nous avons établi un second méta-modèle pour structurer les connaissances sur les procédés. Une fois instancié il offre un degré de décomposition pertinent du procédé pour l'apport d'agilité, allant du niveau le plus élevé (le procédé) au niveau le plus fin (l'opération unitaire). Chaque étape de transformation est vue comme un objectif qu'un service d'acteur (ou un ensemble de services d'acteurs) doit réaliser. De cette façon, les connaissances requises sur les services sont structurées et prêtes à être utilisées pour déduire une chaîne de transformation pertinente par rapport à l'écosystème. Ce cadre de modélisation, orienté métier, permet la mise en œuvre de l'agilité dans l'industrie de procédés d'un point de vue générique

À partir de cette modélisation de l'écosystème, le chapitre suivant expliquera comment exploiter la connaissance pour déduire la chaîne de transformation appropriée selon l'objectif de la collaboration tout en intégrant les spécificités de l'écosystème à un instant  $t$ . (Figure IV-19).

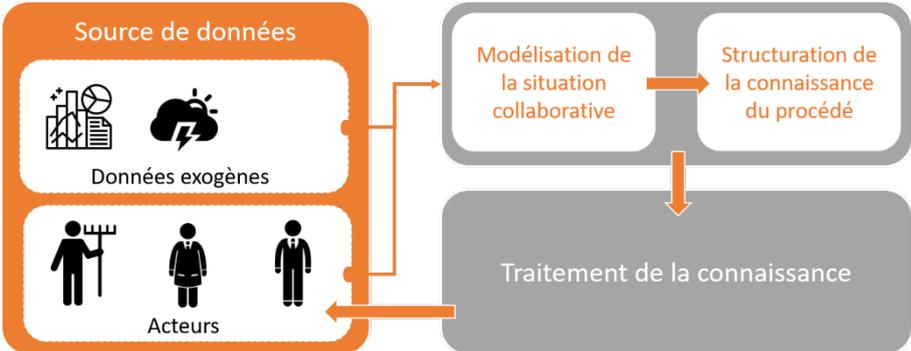


Figure IV-19 : Cadre méthodologique découvrant les étapes de la modélisation et de la structuration de la connaissance

## Chapitre V. Traitement de la connaissance

---

La connaissance de l'écosystème du procédé représentée dans le chapitre IV comprend les flux de matière, les partenaires, leurs services ainsi que les enjeux et les contraintes relatifs à l'environnement considéré. À présent, il est question d'exploiter cette connaissance pour déduire automatiquement la chaîne de transformation de la matière, selon le produit souhaité. Le but est de sélectionner et d'ordonner les services pertinents, selon des critères fonctionnels et non fonctionnels prédéterminés. Dans cette perspective, ce chapitre présentera les mécanismes de déduction à mettre en œuvre pour atteindre le but visé.

Après avoir présenté les objectifs et les enjeux du traitement de la connaissance dans une première partie, une revue de littérature au sujet des mécanismes de déduction de processus existants sera effectuée. Suite à cette analyse, notre logique de déduction sera détaillée dans une troisième partie.

## V.1. Traitement de la connaissance : les objectifs et les enjeux

### V.1.1. Analyse des besoins

Comme vu précédemment dans le chapitre IV, le méta-modèle de l'écosystème du procédé comprend :

- Le méta-modèle de la situation collaborative qui caractérise l'environnement de la situation collaborative en prenant en compte, notamment, les acteurs, leurs services, la matière première disponible, le produit souhaité,
- Le méta-modèle de référence des procédés contenant l'enchaînement des opérations, les flux (entrants, sortants, intermédiaires) et les conditions opératoires.

L'instanciation de ces méta-modèles conduit respectivement à un modèle de situation, propre à un territoire donné et à un référentiel de procédés, d'un point de vue fonctionnel. Ainsi, les modèles obtenus organisent la connaissance nécessaire à la mise en œuvre de l'agilité. Ceci pose la question du traitement de cette connaissance pour parvenir à la déduction de la logique collaborative. La seconde phase de notre cadre méthodologique outillé y est consacrée (Figure V-1).

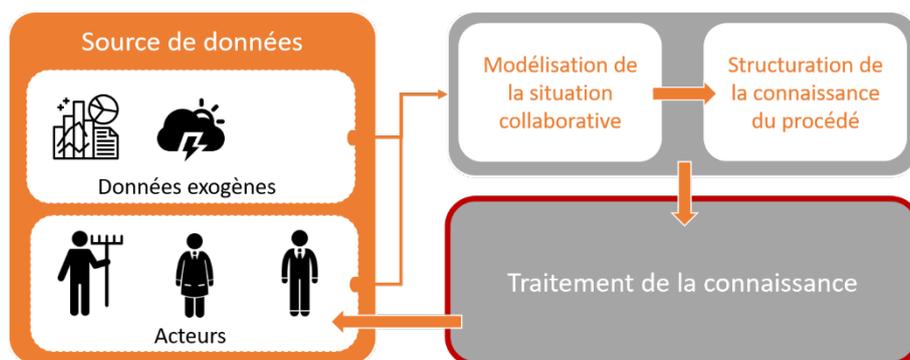


Figure V-1 : Cadre méthodologique de la mise en œuvre de l'agilité : phase de traitement de la connaissance, périmètre d'étude du chapitre IV

### V.1.2. Objectifs du traitement de la connaissance

D'un point de vue conception et exécution du réseau collaboratif, deux buts principaux se dégagent. D'une part, il est attendu que le procédé soit pertinent pour répondre aux besoins de valorisation d'une matière première en un produit final. Plusieurs procédés peuvent être identifiées menant ainsi à une superstructure (ensemble des alternatives possibles). En effet, il peut exister différents procédés pour une matière première et un produit final donnés. D'autre part, l'obtention d'un procédé seul ne suffit pas. Les différentes activités de stockage et de transports logistiques intermédiaires, inhérentes à la réalisation d'un produit par un réseau distribué d'acteurs sont également à intégrer. La chaîne de transformation de la matière résultante nécessitera une gestion et un pilotage des flux de matière et d'informations.

Ainsi, les objectifs du traitement de la connaissance visent à définir et à modéliser la structure du procédé à réaliser en sélectionnant les services disponibles et en y incluant les contraintes logistiques. Ces objectifs soulèvent différentes problématiques.

### V.1.3. Problématiques sous-jacentes

La déduction du procédé pertinent s'appuie sur les données issues : du modèle de situation (propre à chaque situation de collaboration selon la matière première le produit cible, l'environnement, les acteurs, les services susceptibles d'évoluer durant l'exécution du procédé) et du référentiel des procédés comme présenté dans la Figure V-2. Ce mode de raisonnement doit permettre de répondre aux interrogations suivantes :

- Comment sélectionner les services et les partenaires ?
- Comment réaliser l'adéquation entre les activités et les services ?
- Comment prendre en compte les exigences du procédé ?

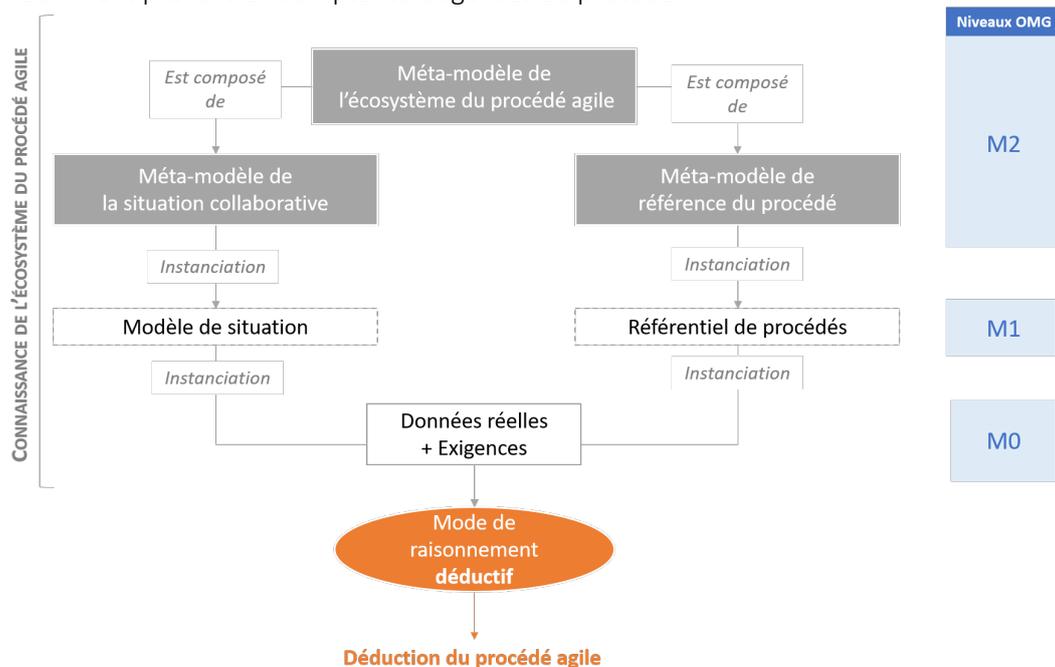


Figure V-2 : Mode de raisonnement adopté pour la déduction de la chaîne de transformation de la matière

#### V.1.3.1 Sélection des services fournis par les partenaires

Dans notre approche, les opérations de transformation sont vues comme des services (As a Service) comme expliqué dans le Chapitre III. En vue de la servicisation du procédé, les services fournis par les acteurs occupent une place centrale. Ce qui pose question sur la méthode de sélection : « Comment sélectionner les services ? ». Leur sélection représente une phase importante. Les enjeux de la sélection des services sont liés à la conception d'un procédé le moins impactant possible d'un point de vue durabilité. À ce sujet, selon (Poux et al., 2015), la conception d'un procédé durable implique une approche système prenant en compte toutes les opérations de transformation, selon deux limites de système : « du berceau au portail » (de l'extraction des matières premières à la fabrication) et « du berceau à la tombe » (de l'extraction des matières premières au traitement des déchets ». Dans le cadre de ces travaux, qui constituent une première approche de notre conception de l'agilité, les limites du système seront de type « du berceau au portail ». Les services prendront en compte la récolte de la matière et les opérations de transformation.

Par ailleurs, en prenant en compte les éléments présentés dans la section précédente, il paraît judicieux que le choix des services constituant le procédé se base sur des exigences fonctionnelles (ce que le service fait) mais également sur des exigences non fonctionnelles (comment le service fait).

La section suivante aborde la problématique sur les caractéristiques des services nécessaires pour assurer la transformation de la matière au travers des exigences fonctionnelles et non fonctionnelles.

### V.1.3.2 Exigences fonctionnelles et non fonctionnelles du procédé

Il convient de se questionner sur les exigences auxquelles le procédé doit se conformer afin d'être en mesure de satisfaire les opportunités de transformation de la matière.

S'étendant à tout type de système la notion d'exigence peut faire l'objet d'autres appellations telles que facteurs ou encore critères. La norme IEEE 610.12 la définit de deux manières :

*« Une condition ou une capacité dont un utilisateur a besoin pour répondre à un problème ou atteindre un objectif »*

ou

*« Une condition ou capacité que doit posséder un système ou un composant de système pour satisfaire un contrat, un standard, une spécification ou tout autre document imposé formellement ».*

Ainsi, en quelques mots, une exigence décrit clairement les caractéristiques auxquelles doivent satisfaire un produit ou un service. Par ailleurs, l'AFIS (l'Association Française pour Ingénierie Système) ajoute que l'exigence peut également traduire une contrainte.

La norme IEEE 830-1993, met en évidence les principales caractéristiques d'une exigence telles que :

- L'exactitude : correspond bien à un besoin réel,
- La non ambiguïté : décrite par une expression unique,
- La complétude : pas de manquements ou de flous,
- La cohérence : pas d'exigences contradictoires,
- La vérification : possibilité de vérifier une exigence grâce à une méthode,
- La modification : si et seulement si l'accès aux changements d'exigence est facile et cohérent,
- La traçabilité : toute modification est enregistrée et peut être retrouvée.

En s'appuyant sur la norme IEEE 830-1993 qui précise également les différents types d'exigences d'un système, les travaux de (Afreen et al., 2015; Glinz, 2007) déterminent une taxonomie des exigences qui les classent en deux groupes : les exigences fonctionnelles ainsi que les exigences non fonctionnelles regroupant la performance, les qualités spécifiques, les contraintes et les attributs comme présenté sur la Figure V-3.

Sur ce point (Badreau et al., 2014) résumant les exigences fonctionnelles à ce qu'est capable de réaliser un système (« le faire ») et les exigences non fonctionnelles au comment, c'est-à-dire la manière dont va se comporter le système pour les réaliser (« l'être »). Dans notre cas, les deux types d'exigences sont importantes. Les exigences fonctionnelles sont déterminantes pour la servicisation des activités, dans la mesure où elles déterminent ce que doit faire le service pour réaliser l'activité. Quant aux exigences non fonctionnelles, elles peuvent influencer la sélection ou non d'un service. Notamment, dans des situations où deux acteurs offrent un service ayant des exigences fonctionnelles identiques. Les services sont alors mis en concurrence. Le choix du service le plus approprié reposera sur comment il réalisera l'activité dans chaque cas.

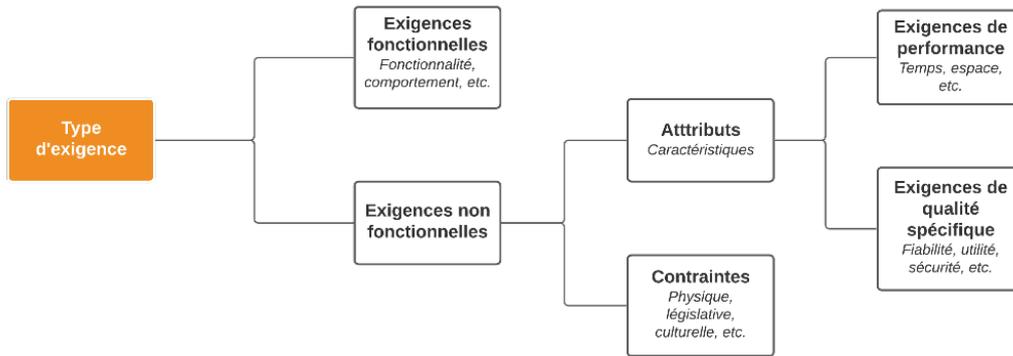


Figure V-3: Taxonomie des exigences adaptée de (Afreen et al., 2015; Glinz, 2007)

En ciblant l'aspect collaboratif, dans le cadre OpenPaas (Platform As A Service), les travaux de (Montarnal, 2015) ont mené à la réalisation d'un cadre générique des exigences non fonctionnelles. Il s'applique non seulement au secteur du B2B mais également à d'autres secteurs professionnels.

Ce cadre intègre trois dimensions qui répondent aux questions suivantes :

- Quel est le niveau d'application des exigences non fonctionnelles ?
  - Produit, Service, Organisation, Collaboration
- Qui est en capacité d'évaluer les exigences non fonctionnelles ?
  - L'organisation (évaluation objective issue d'indicateurs)
  - Le partenaire (évaluation subjective émanant d'opinions personnelles)
  - Le système d'informations (évaluation calculée)
- À quelle catégorie s'apparente l'exigence non fonctionnelle ?
  - Coût, Service, Qualité, Temps (Johansson et al., 1993)

Selon ces auteurs, l'équation :  $[(\text{qualité} \times \text{service}) / (\text{coût} \times \text{délai})]$  exprime la valeur totale de la prestation d'une entreprise, qu'elle délivre un service ou un produit. Cette équation synthétique souligne l'impact de l'amélioration d'une catégorie au détriment de l'aggravation d'une autre. À noter qu'elle a été utilisée par (Ben Naylor et al., 1999) ou encore (Christopher et Towill, 2000) dans des travaux en lien avec l'agilité de la chaîne logistique.

Ces travaux ont abouti à une liste non exhaustive de quarante-deux exigences non fonctionnelles, organisées en quatre groupes : la qualité, le service, le coût et le temps. Chaque exigence a été définie et possède des métriques. Cette approche permet non seulement de gagner en précision au-delà des traditionnelles exigences de coût, délai et qualité, mais aussi de pouvoir automatiser la sélection des services compte-tenu « la bonne caractérisation » des exigences. Par « bonne », il faut comprendre une définition des exigences en accord avec la norme IEEE 830-1993.

En plus des exigences non fonctionnelles, la prestation d'une entreprise peut être évaluée grâce à des Indicateurs Clés de Performance (KPI) (Key Performance Indicator). À ce sujet, le domaine de recherche sur la collaboration inter-entreprises fondée sur l'échange de matériaux, d'énergie, d'eau ou encore de sous-produits appelée symbiose industrielle ou parc éco-industriel (Chertow, 2007) a été à l'origine du développement de KPI pour de l'aide à la décision ainsi que pour le suivi de mise en place de ce type de collaboration. Dans le cadre du projet EPOS (Enhanced Energy and resource Efficiency and Performance in process industry Operations via onsite and cross-sectorial Symbiosis), les travaux de (Kantor et al., 2019) présentent différents KPI clairement définis. Ces derniers sont compatibles avec le secteur de l'industrie de procédés.

Compte-tenu des éléments précédents, dans le cadre de ces travaux de thèse, les exigences fonctionnelles traitent de la capacité d'un service à réaliser une activité. Tandis que les exigences non fonctionnelles pertinentes choisies sont synthétisées dans le Tableau V-1.

Catégorie	Intitulé	Définition	Niveau d'application	Évaluateur	Métrique	Unité
Qualité	Caractéristiques	Détails du service proposé	Service	Partenaire	Description syntaxique et sémantique	Sans unité
	Fiabilité	Conformité du service aux garanties de capacité et de précision attendues	Service	Partenaire	Évaluation syntaxique et sémantique	Sans unité
	Certifications	Procédures assurant la régularité de la réalisation du service selon des caractéristiques évaluables et définies dans un référentiel de certification	Organisation	Partenaire	Liste des certifications	Sans unité
	Émissions atmosphériques	Mesure de gaz à effet de serre (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , COV, Ozone,...)	Service	Partenaire	Quantité équivalent CO <sub>2</sub> par an	Teq <sub>CO2</sub>
Service	Emplacement	Lieu de réalisation du service	Service	Partenaire	Coordonnées GPS (X, Y)	Degrés et minute décimale
	Sécurité : fréquence des accidents	Taux de fréquence : nombre d'accidents avec arrêt de travail supérieur à un jour, survenus au cours d'une période de 12 mois par million d'heures de travail	Service	Partenaire	(Nombre d'accident avec arrêt x1000000)/(Nombre d'heures travaillées)	Sans unité
Coût	Coût estimé	Prix donné à titre indicatif par rapport à une estimation du service au vu de l'activité à réaliser	Service	Partenaire	Nombre et devise	€
	Coût total	Coût complet calculé postérieurement à la réalisation du service	Service	Partenaire	Nombre et devise	€
	Finance	Situation financière de l'organisation	Organisation	Partenaire	Recettes avant intérêts, taxes, amortissements	€
Temps	Proximité	Distance entre acteurs de la collaboration	Réseau collaboratif	Système	Distance	M
	Voies d'accès entre les acteurs de la collaboration	Disponibilité de connexions majeures entre les acteurs du réseau	Organisation	Système	Description sémantique et syntaxique	Liste de modalités

Tableau V-1 : Exigences non fonctionnelles appliquées au procédé adapté de (Kantor et al., 2019; Montarnal, 2015)

La section suivante aborde la problématique de la correspondance entre le service et l'activité.

### V.1.3.3 Correspondance entre l'activité et le service

Une autre étape majeure de la servicisation du procédé repose sur l'équivalence entre une activité donnant les conditions de réalisation théoriques en termes de comportement physico chimique (détaillées dans la littérature) et un service mettant en œuvre les savoirs, dont principalement le savoir-faire, détenu par les acteurs. L'enjeu réside dans l'identification d'une correspondance, dans le sens d'une réconciliation sémantique, entre l'activité et le service à partir de la combinaison de données provenant de sources hétérogènes (Monge et Elkan, 1996). Le but ici n'est pas de détailler intégralement le processus de réconciliation sémantique, mais d'avantage d'en saisir le fonctionnement général.

La réconciliation sémantique est une solution qui définit des relations entre des informations hétérogènes (Szejka et al., 2017) afin de permettre la transformation de contenu sémantique d'un émetteur à un récepteur grâce à des règles de réconciliation basée sur une ontologie (Vujasinovic et al., 2010). En effet, l'interopérabilité des systèmes d'information est un enjeu majeur de ce champ de recherche. La réconciliation sémantique a fait l'objet de plusieurs recherches concernant la collaboration inter-organisationnelle pour (Boissel-Dallier, 2012), la conception et la fabrication de produits manufacturiers pour (Chungoora et Young, 2011; Szejka et al., 2017) ou encore la chaîne logistique (Vujasinovic et al., 2010).

Cette réconciliation sémantique entre les activités des procédés et les services des acteurs revient à faire correspondre le sens des mots utilisés pour désigner une activité et le sens des mots employés pour désigner un service. En s'appuyant sur les travaux de (Bénaben et al., 2013), l'enjeu sémantique peut être qualifié de fonctionnel dans la mesure où le service doit en premier lieu être en capacité de réaliser les opérations nécessaires au bon déroulement de l'activité. La Figure V-4 illustre ce propos.

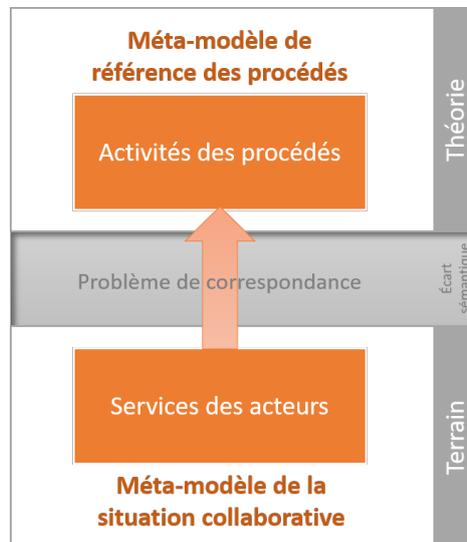


Figure V-4 : Problème de réconciliation sémantique entre l'approche théorique d'exécution des procédés et l'approche terrain du savoir-faire des acteurs adapté de (Bénaben et al., 2013)

La réconciliation sémantique activité-service représente à elle seule un sujet de recherche à part entière. C'est la raison pour laquelle, il sera admis que les acteurs effectueront eux-mêmes la correspondance de leur service avec l'activité à réaliser. Pour y parvenir, ces derniers analyseront le ou les termes associés à l'activité selon une liste préétablie. Cette correspondance jugée manuelle repose sur une hypothèse forte. En effet, il est nécessaire que l'acteur fasse preuve de véracité et de justesse dans l'adéquation entre le service proposé et l'activité considérée.

La section suivante traite de l'organisation de l'enchaînement des services.

#### V.1.3.4 Séquencement des services

Tout d'abord, le procédé approprié au contexte de la situation collaborative est sélectionné. Puis, les services sont à leur tour sélectionnés pour réaliser une ou plusieurs étapes du procédé. Ainsi, l'enchaînement des activités composant le procédé fixe l'ordre dans lequel les services sélectionnés doivent s'exécuter.

(Nawaz et al., 1983) définissent la problématique de séquencement comme :

*« La définition de l'ordre (rang, priorité, etc.) d'un ensemble de travaux (tâches, articles, etc.) lorsqu'ils passent d'une machine (processeur) à une autre. »*

Les travaux sont assimilés aux services. Autrement dit, pour un service donné, l'objectif est de définir le service qui le précèdera (son prédécesseur) et le service qui le suivra (son successeur). Deux exceptions sont à prévoir pour le premier et le dernier service engagés dans le procédé qui n'ont respectivement pas de prédécesseur et pas de successeur. Le problème de séquencement revient alors à organiser l'exécution de tâches, lors de la déduction initiale du procédé (vision statique avec une planification prévisionnelle) mais également pendant son exécution (vision dynamique avec une reconfiguration dépendant du type de changement qui a lieu et de son impact sur l'exécution du procédé). Ainsi, la politique de séquencement (c'est-à-dire les règles de priorité) inclut également l'enchaînement de la gestion des temps d'attente entre les services. Le contexte et la nature de la matière première sont primordiaux dans le choix de la politique de séquencement. Le procédé évolue dans un contexte particulièrement variable comprenant une diversité de matières premières dont l'aspect, la composition chimique ou encore le conditionnement influent sur le type et les temps de stockage et de transport à utiliser.

(Panwalkar et Iskander, 1977) établissent une classification des règles de séquencement selon trois grandes catégories :

- Des règles simples relatives au temps de fabrication, à la date de livraison, au nombre d'étapes de fabrication, au coût des différentes étapes, à l'heure d'arrivée ou encore au temps de préparation des équipements,
- Des règles combinant les règles simples précédemment citées qui peuvent intégrer des notions de poids pour certains critères,
- Des règles heuristiques pour les situations plus complexes mettant en jeu des temps de chargement à anticiper en amont ou encore la programmation d'un équipement particulier.

Parmi toutes les règles existantes, celle qui semble être appropriée pour le séquencement du procédé relève d'une règle de séquencement simple où la matière passe une fois par chaque étape de transformation (cheminement unique). La matière première (flux entrant initial) est transformée pour créer un flux sortant. Puis, ce flux sortant devient un flux entrant pour l'étape suivante avant d'être lui-même transformé en un autre flux sortant, et ainsi de suite jusqu'au produit final (flux sortant final). Une fois une étape terminée, le flux sortant peut être mis en attente s'il ne peut être traité dans une durée appropriée par l'étape qui le succède. Les files d'attente fonctionnent selon le principe du "premier entré, premier sorti" (First In First Out) (Pinedo, 2016).

Après avoir détaillé les problématiques à considérer pour la déduction du procédé pertinent, la section suivante explorera les logiques de déduction existantes sur lesquelles nous pourrions nous baser.

---

## V.2. Mécanismes existants de déduction des processus

De manière globale, avec un niveau d'abstraction élevé, un réseau collaboratif peut être vu comme un processus. Notre vision de l'agilité se base sur la construction d'un réseau collaboratif qui doit prendre en considération les problématiques définies précédemment. À cette fin, après avoir mis en évidence les approches de construction du réseau, les processus de déduction seront analysés afin de déterminer s'ils peuvent être utilisés dans notre cas.

### V.2.1. Types d'approches relatives à la conception de processus

Deux approches majeures se distinguent selon le mode de conception du processus.

La première approche est de type « bottom-up ». Elle se caractérise par l'utilisation de données et d'informations provenant de processus existants : les logs (fichiers journaux). Selon (Duan et Xu, 2012; Grigori et al., 2004), l'analyse de ces logs<sup>5</sup> peut participer à une aide à la décision plus efficace. La déduction de processus fait partie intégrante de nombreux outils et de technologies pour la gestion des processus métiers. Ces derniers sont regroupés dans ce qui est appelé l'Intelligence Métier (Business Intelligence). À cet effet, la fouille de processus (Process Mining) utilise les logs pour étudier le processus dans sa globalité. Le Process Mining Manifesto (van der Aalst et al., 2012) contient les fondements et les principes directeurs de cette discipline scientifique, qui fait le pont entre la fouille de données et la modélisation de processus métier. L'objectif est d'extraire de la connaissance des logs pour découvrir, surveiller ou améliorer des processus existants. Cette approche n'est que partiellement pertinente pour fournir de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière parce que cela suppose qu'elle est déjà existante et opérationnelle. Or, dans notre cas, nous cherchons aussi à la construire.

La seconde approche est de type « top-down ». Elle consiste à concevoir le processus, du début à la fin, en partant de rien. Dans ce cas, la conception s'effectue selon un objectif clairement défini. Dans notre cas, ce positionnement est davantage en accord avec notre vision de la conception du processus collaboratif. En effet, de cette manière, le processus se construit en organisant la sélection et le séquençement des services ainsi que leur exploitation, en fonction de la situation dans laquelle le processus évolue.

### V.2.2. Mécanismes de déduction de processus dans différents domaines métier

Afin de conserver une démarche la plus générique possible, il semble intéressant d'explorer les mécanismes de déduction de processus existants, dans différents domaines métiers. Ces travaux seront analysés selon l'organisation de la connaissance, le mode de conception et la modélisation du processus obtenu ainsi que les critères liés à la déduction du procédé tels que : la sélection de services, la prise en compte d'exigences non fonctionnelles, la correspondance activité-service et le séquençement (Tableau V-2).

Dans le domaine hospitalier, pour favoriser le processus de prise en charge des patients, les travaux de (Wang et al., 2014) proposent une méthodologie d'aide à la décision basée sur un raisonnement sémantique. Suite à la collecte des données dans l'hôpital considéré, des processus de prise en charge du patient sont déduits en fonction de la pathologie. Ces chemins personnalisés sont associés à l'organisation même de l'hôpital afin de la rendre plus efficace.

Cette méthodologie se compose de quatre grandes étapes :

---

<sup>5</sup> Le log représente un fichier, ou tout autre dispositif, permettant de stocker un historique horodaté et chronologique des événements attachés à un processus, d'un système informatique.

- La collecte de données en rapport avec les pathologies traitées par l'hôpital,
- La construction d'une ontologie suivant les recommandations gouvernementales,
- La transformation sémantique qui passe par une transformation de l'ontologie en un modèle de données sémantique,
- Les règles de déduction pour déterminer les parcours hospitaliers spécifiques à chaque pathologie.

Dans le domaine industriel, la planification de processus comprend les séquences des opérations, les temps de réalisation ou encore le choix des méthodes de fabrication. (Kang et al., 2016) proposent une méthode pour sélectionner et séquencer les processus d'usinage selon la description des caractéristiques d'usinage, la modélisation des connaissances de fabrication à travers une ontologie et des règles d'inférence pour le choix du processus d'usinage pertinent. Pour une pièce à usiner, cette approche aboutit à une liste d'alternatives possibles de processus répondant aux exigences de production.

Dans le domaine biomédical, (Henry et al., 2020) ont développé une ontologie BiPOm qui permet d'une part de représenter les processus de fonctionnement métaboliques et d'autre part de déduire et de formaliser automatiquement les propriétés des molécules qui y participent. La modélisation du processus métabolique est basée sur une représentation d'analyse fonctionnelle de type SADT. Par la suite, des inférences ont été réalisées afin de déduire les propriétés de molécules.

Auteur, Date	Secteur	Structure de la connaissance	Processus	Critères requis de la démarche l'apport d'agilité			
			Modélisation	Sélection des services	Exigences non fonctionnelles	Activité Service	Séquencement
(Henry et al., 2020)	Biomédical	Ontologie	-				x
(Kang et al., 2016)	Industriel	Ontologie	SADT				x
(Wang et al., 2014)	Hospitalier	Ontologie	Chemin clinique				x

Tableau V-2 : Déduction de processus dans différents domaines métiers

Ces méthodes font appel à des moteurs d'inférence, outils nécessaires à l'exécution des règles, lorsque la connaissance est structurée avec une ontologie. Des similarités se retrouvent dans leur approche de déduction : collecte de la connaissance, structuration de la connaissance et son exploitation. Parmi les travaux analysés, aucun ne couvre les critères requis dans notre domaine d'application. Bien que le séquencement des activités soit systématiquement pris en compte, ces travaux n'intègrent pas de notion de service et à fortiori de correspondance entre un service et une activité de leur processus.

### V.2.3. Déduction de processus collaboratif

Nous nous concentrons sur les travaux de déduction de processus inter-organisationnels. Comme dans la section précédente, les travaux seront analysés en fonction des critères de la déduction du procédé. Un aspect supplémentaire sera étudié : la méthode de déduction du processus (Tableau V-3).

---

Les travaux de (Rajsiri et al., 2008, 2010) permettent de déduire un processus collaboratif concernant les trois niveaux de décisions (stratégique, tactique, opérationnel). Cette approche se base sur une ontologie du processus collaboratif et des règles de déduction. L'ontologie du processus collaborative est composée d'une ontologie de la collaboration (conceptualisation de la collaboration inter-organisationnelle) et d'une ontologie du processus collaboratif (conceptualisation du processus collaboratif). Les connaissances génériques du processus sont issues des processus métier décrits dans le MIT Processus Handbook (Malone et al., 2003). Le système créé dans les travaux de (Rajsiri et al., 2010) se décompose en trois étapes : la collecte de la connaissance, la représentation et le raisonnement de la connaissance ainsi que la modélisation du processus collaboratif sous format standardisé BPMN (Business Process Management and Notation).

Dans le cas des processus commerciaux inter-organisationnels, (Ko et al., 2011) ont développé l'ontologie BOWL (Business OWL) qui permet de décomposer la connaissance des activités du processus d'entreprise en tâches opérationnelles, pour un objectif commercial considéré. De plus, ces auteurs proposent une méthode appelée Genesis qui à partir de l'ontologie BOWL prend en compte : le lissage et l'ordonnement des activités ainsi que la création de processus collaboratifs grâce à un algorithme. Les critères non fonctionnels tels que le prix, le type de produit ou encore le temps de cycle du produit sont pris en compte. Cette ontologie facilite la mise en place dans des délais courts de processus collaboratifs dits « à la volée ».

Les travaux de (Mu et al., 2016) visent à automatiser la sélection de services métier pour la modélisation de processus BPMN. La connaissance est structurée sur les bases de l'ontologie de la collaboration de (Rajsiri et al., 2010). Dans la continuité de ces travaux, (Montarnal et al., 2018) ont créé un système d'aide à la décision basé sur un algorithme de colonies de fourmis, dans une volonté de choisir les meilleurs partenaires pour la collaboration. L'objectif dans les deux cas est de déduire de manière automatique le processus métier collaboratif (quel que soit le métier). Pour ce faire, la connaissance disponible repose sur un répertoire d'entreprises (qui proposent leur services) et des finalités de processus (les opportunités). La méthode employée comprend trois grandes étapes : i) la définition des services d'entreprise disponibles, ii) la sélection des partenaires les plus à même de réaliser l'objectif et iii) l'organisation des services de manière optimisée. Deux ontologies coexistent : une précise le domaine d'activité, dans la même dynamique que les travaux de (Ko et al., 2011) et une autre détaillant une connaissance générique de la collaboration.

Pour faciliter la modélisation de processus collaboratifs, (Wisniewski et al., 2018) ont travaillé sur une approche pour la création de modèle BPMN via une méthode de composition de processus. La première phase consiste à collecter des données concernant le processus à partir de déclarations des acteurs impliqués. Dans la seconde phase, les fichiers déclaratifs (avec les données d'entrée et sortie complétées par les acteurs) sont regroupés et traités par programmation par contraintes. Cet outil garantit le bon enchaînement des activités par rapports aux attentes de la modélisation de processus. Il en résulte un log complet du processus qui peut être une donnée d'entrée pour du process mining ou être exécuté par un algorithme qui utilise l'aspect graphique du modèle pour générer un modèle BPMN.

Les travaux de (Montarnal et al., 2018) couvrent l'ensemble des critères requis pour le procédé. Toutefois, l'organisation de la connaissance diffère avec notre démarche sur le type de modèle utilisé. La déduction automatique du processus collaboratif grâce à un algorithme de colonie de fourmis est intéressante. Le recours à une métaheuristique de ce type répond d'une part au besoin de déduction et d'autre part, à la sélection des services pour la meilleure collaboration.

Auteur, Date	Structure de la connaissance	Processus			Critères requis de la démarche pour l'apport d'agilité			
		Modélisation	Mode de conception	Méthode de déduction	Sélection des services	Exigences non fonctionnelles	Activité Service	Séquencement
(Rajsiri et al., 2010)	Ontologie du réseau collaboratif	BPMN	Top-down	Règles de déduction	x			x
(Ko et al., 2011)	BOWL	BPMN	Top-down	Algorithme GENESIS		x		x
(Mu et al., 2016)	Ontologie de la collaboration	BPMN	Top-down	Règles de déduction	x		x	x
<b>(Montarnal et al., 2018)</b>	<b>Ontologie de la collaboration + Ontologie du domaine métier</b>	<b>BPMN</b>	<b>Top-down</b>	<b>Algorithme de fournis</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
(Wisniewski et al., 2018)	-	BPMN	Bottom-up	Programmation par contraintes				x

Tableau V-3 : Déduction de processus pour une collaboration selon les critères de déduction pour l'apport d'agilité

Cependant, le domaine d'application des travaux de (Montarnal et al., 2018) couvre des activités très génériques (vendre, acheter, payer), issues de la base de connaissance du MIT Process Handbook. Ces activités sont très éloignées du domaine de la transformation de la matière. De plus, ces activités, très macro et couvrant un domaine commercial, ne sont pas au niveau de granularité requis et ne possèdent les exigences fonctionnelles nécessaires pour la transformation de la matière. Par ailleurs, ces travaux se sont attachés à déterminer l'activité cohérente pour le bon domaine métier. Or ces aspects n'ont pas lieu d'être traités dans ces travaux étant donné que les activités de transformation visent le domaine de la transformation de la biomasse.

#### V.2.4. Macro étapes de notre proposition de déduction

Forts de l'analyse des travaux du paragraphe précédent, les grands axes de la déduction du procédé se dessinent. Cette démarche est synthétisée dans le Tableau V-4.

Partant d'une approche top-down, notre proposition de déduction s'appuie sur une structure de la connaissance comportant deux méta-modèles. Un algorithme permettra de déduire la chaîne de transformation de la matière.

La modélisation du processus ne sera pas traitée dans ces travaux.

	Structure de la connaissance	Processus			Critères requis de la démarche d'apport d'agilité			
		Modélisation envisagée	Mode de conception	Méthode de déduction	Sélection des services	Exigences non fonctionnelles	Activité Service	Séquencement
Notre démarche	Méta-modèle de la collaboration spécifique au Génie du Procédé + Méta-modèle de référence du procédé	BPMN	Top-down	Algorithme de déduction	x	x	x	x

Tableau V-4 : Notre approche de déduction pour le procédé

Notre proposition de déduction comporte trois grandes étapes comme présenté sur la Figure V-5 telles que :

1. **La collecte et l'organisation** des données s'intéressent aux données qui alimentent les méta-modèles de la situation collaborative (services et acteurs) et du référentiel de procédé. Cette phase intègre deux aspects fondamentaux. Le premier aspect, la collecte des données, décrit les acteurs et l'offre de services globale que ces derniers peuvent proposer. Cette offre de services est caractérisée. De plus, elle se compose de services destinés à la transformation de la matière (au niveau du procédé) mais également de services réservés à la logistique. Ainsi, chaque acteur met à disposition un ensemble de services hétérogènes, représentatif de ses savoirs sur le terrain. La seconde phase établit une correspondance entre l'offre de service proposée par les acteurs et leur capacité à réaliser une activité référencée dans le référentiel de procédé. À l'issue du traitement préliminaire, les données nécessaires pour faire émerger les services en capacité de réaliser une ou plusieurs étapes de transformation sont mises en évidence.
2. Le **cœur de notre logique de déduction** a pour objectif de faire émerger une superstructure de procédés, d'un point de vue fonctionnel. Pour y arriver, avant toute chose, il est indispensable de connaître les besoins terrain et la matière première disponible. Ces derniers conditionnent le(s) procédé(s) référencé(s) possible(s) pour le territoire considéré. Puis, la sélection et le séquencement des services d'acteurs cohérents et disponibles vis-à-vis de(s) procédé(s) pertinent(s) permet d'établir un ensemble d'alternatives de transformation possibles. À l'issue de cette phase, la superstructure de procédés obtenue nécessite d'être affinée afin de passer de « procédés pertinents » à « chaîne de transformation réalisables ».
3. La **sélection des chaînes de transformation réalisables** implique deux niveaux de granularité. Le premier niveau est le procédé. Des filtres non fonctionnels seront appliqués à la superstructure de procédé afin de ne garder que ceux qui sont les plus pertinents pour le territoire considéré. Le second niveau de granularité concerne la chaîne logistique. Ainsi, une vision large de la transformation de la matière se dessine, incluant l'approvisionnement de la matière première jusqu'à la livraison du produit final. En d'autres termes, les services logistiques proposés par les acteurs sont sélectionnés et séquencés d'un point de vue fonctionnel, vis-à-vis du procédé. Puis les mêmes filtres non fonctionnels que ceux appliqués aux services de transformation sont également appliqués. Le résultat à la fin de cette étape aboutit à la chaîne de transformation de la matière.

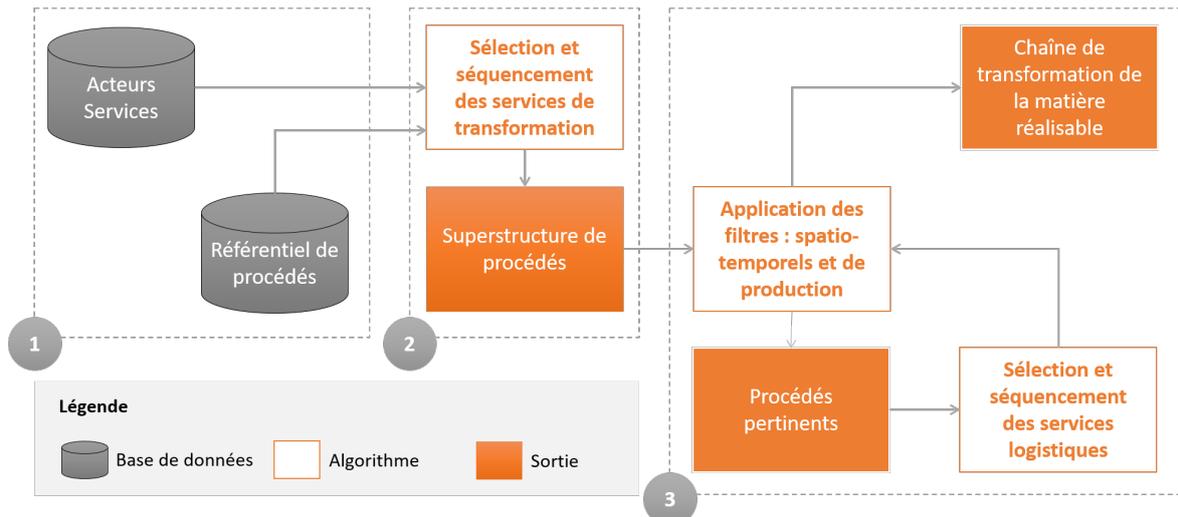


Figure V-5 : Schéma de notre proposition de mécanisme de déduction pour la chaîne de transformation de la matière

Le détail des macro étapes seront présentés dans les sections suivantes.

### V.3. Logique de déduction

Le traitement de la connaissance s’effectue en deux étapes dont la première s’intéresse à la déduction de la chaîne de transformation de la matière (Figure V-6).

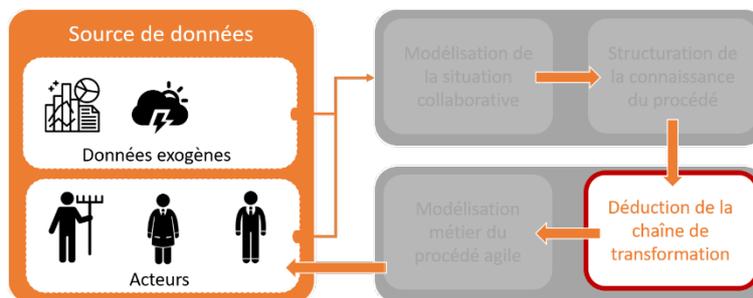


Figure V-6 : Vision du cadre méthodologique outillé centrée sur l'étape de déduction de la chaîne de transformation

#### V.3.1. Hypothèses de travail pour la déduction de la chaîne de transformation de la matière

Afin de préciser le périmètre de notre logique de déduction, les hypothèses suivantes sont posées :

- **Un service réalise une activité.** La composition de service, c’est-à-dire plusieurs services œuvrant en parallèle pour répondre à la même activité ne sera pas traitée.
- **Aucune ingénierie ne sera effectuée quant à la proposition du service par les acteurs.** Chaque acteur possède le savoir et le savoir-faire nécessaire et suffisant pour réaliser le service dans les règles de l’art.
- Les procédés de transformation de la matière visés sont essentiellement de type **discontinu « batch » ou semi-continu.**

La portée de ces hypothèses sera discutée dans le chapitre VI.

### V.3.2. Structuration des données

Une première étape consiste à structurer et stocker l'ensemble des données via une base de données. Les données, provenant de sources diverses et hétérogènes de l'écosystème, peuvent représenter un volume important susceptibles de changer. Afin de faciliter la compréhension et les interactions entre elles, la modélisation conceptuelle des données permet de définir la structure de la base de données relationnelle. Dans cette optique, nous nous baserons sur une modélisation des données de type entité-association (Chen, 1976) comme présenté dans la Figure V-7. Ce formalisme permet d'avoir une vision globale et uniforme des données pertinentes selon notre besoin, ce qui facilite leur stockage, leur gestion, leur récupération et leur actualisation.

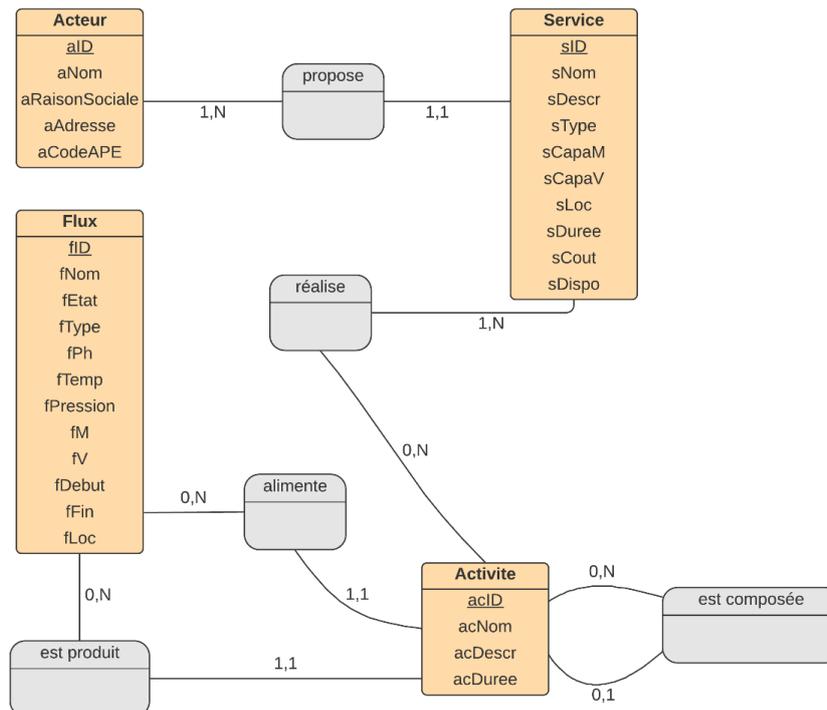


Figure V-7 : Modèle conceptuel de données pour la chaîne de transformation de la matière

Les entités font référence à une identification d'objet sans ambiguïté. Pour la chaîne de transformation de la matière il s'agit des entités : acteur, service, activité et flux. Chaque entité dispose de propriétés. Il s'agit de données élémentaires perçues. Chaque entité doit pouvoir être identifiée de manière unique et sans ambiguïté grâce à une clé primaire. Sur la Figure V-7, il s'agit de la propriété soulignée. Une association lie au moins deux classes d'entités. Il s'agit des associations : propose, alimente, est produit, est composé et réalise.

L'acteur est un potentiel partenaire. Il est identifié par un numéro de SIRET (Système Informatique pour le Répertoire des Entreprises sur le Territoire), des données administratives ainsi que la liste des services qu'il propose.

Chaque acteur propose un ou plusieurs services qui seront sélectionnés, selon leur pertinence pour le(s) procédé(s) retenu(s) en fonction de la situation. Le service possède un identifiant unique. Alors même qu'un service possède un seul nom, deux services peuvent porter le même. Toutefois, ils ne peuvent pas avoir le même identifiant. La description du service précise sa fonction et son objectif. Deux types de services se distinguent : le service de transformation (réalisant une activité du procédé et modifiant la structure physique, chimique ou biologique de la matière) et le service logistique (assurant le mouvement des flux matières). Concernant la logistique, deux types d'opérations sont pris en compte : le transport (compte-tenu les distances à parcourir à l'échelle du territoire) et le stockage.

Les opérations de manutention, véritables liants pour passer d’une activité à une autre (chargement, déchargement, alimentation d’un équipement) sont directement intégrées aux opérations logistiques. De plus, le service possède des propriétés représentant la capacité massique et volumique pouvant être prise en charge lors de l’exécution du service. Le lieu d’exécution du service est localisé au moyen de coordonnées GPS. Chaque service est caractérisé par une durée et un coût journalier. De plus, l’acteur propose son ou ses service(s) selon un calendrier de disponibilité.

Il est aussi envisageable qu’aucun des services proposés ne puisse réaliser une activité nécessaire. L’activité a un identifiant unique, un intitulé, une description ainsi qu’une durée théorique minimale, en dessous de laquelle il n’est scientifiquement pas possible de la réaliser. Pour rappel, au plus haut niveau d’abstraction, une seule et même activité comprend l’ensemble du procédé. Chaque activité du procédé se décompose en un nombre fini d’activités.

Chaque activité possède deux types de flux : un flux entrant qui alimente l’activité et un flux sortant qui est produit par l’activité. À noter, qu’un service qui réalise une activité a les mêmes flux que l’activité. Chaque flux détient un identifiant unique. Il est caractérisé par des propriétés physico-chimiques (type de la matière impliquée dans l’activité, masse, volume, pression, température). Ces propriétés physiques désignent les valeurs minimales requises pour assurer une bonne exécution du procédé. Le flux est localisé. De plus, il est disponible sur une période de mise à disposition. Le détail des propriétés (description et métrique) de chaque entité est précisé dans l’Annexe 5.

Le schéma de la Figure V-8 illustre le modèle entité association de la Figure V-7, tel que :

- Les acteurs sont au nombre de trois : A, B et C
- Les services sont répartis comme suit :
  - L’acteur A propose le service de transformation STA1 et le service logistique SLA1,
  - L’acteur B propose le service de transformation STB1 et le service logistique SLB1,
  - L’acteur C propose les services de transformation STC1, STC2, STC3 et les services logistiques SLC1, SLC2,
- Les activités sont détaillées du plus haut niveau de granularité Act1 au plus détaillé Act111 et Act112
- Les flux sont représentés par les flèches qui selon leur sens indiquent un flux entrant (alimentant l’activité) ou un flux sortant (produit par l’activité)

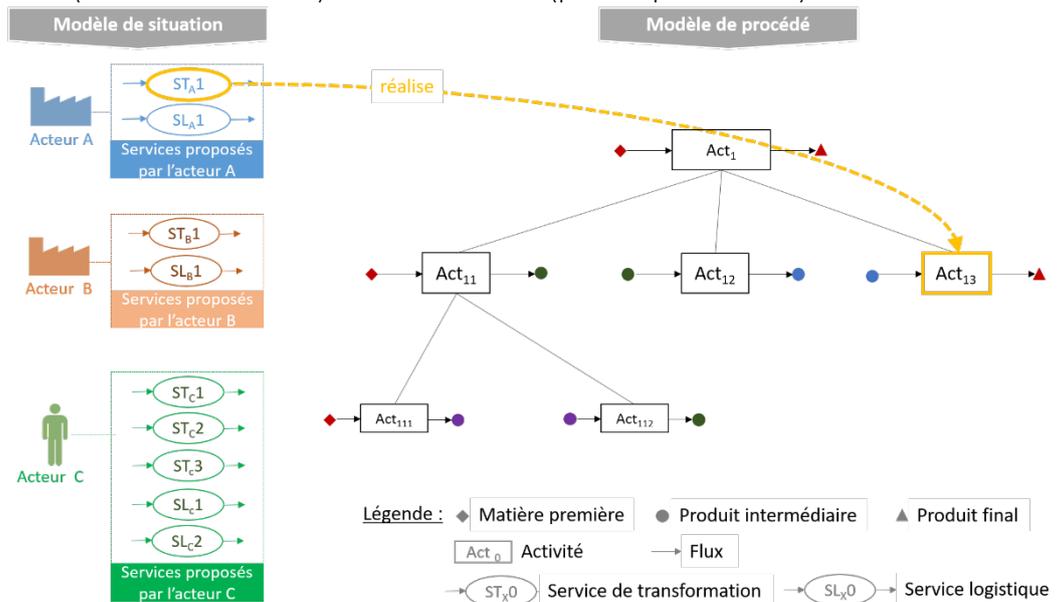


Figure V-8 : Illustration schématique du modèle entité association

### V.3.3. Détail des étapes de notre démarche

Pour guider le lecteur pas à pas dans la démarche, chaque étape sera illustrée un exemple d'application fil rouge qui s'appuie sur la schématisation du modèle entité-association de la Figure V-8.

#### V.3.3.1 Traitement préliminaire des données

La phase de traitement préliminaire facilite la manipulation des données pour les phases suivantes de la démarche de déduction. Elle met en évidence les services d'acteurs disponibles pouvant effectuer une activité du référentiel des procédés. Il est important de préciser qu'à ce niveau de la déduction, seuls les services de type transformation sont concernés. Cette phase préliminaire comprend plusieurs étapes présentées ci-après.

#### Étape 1 : Connaître la liste des activités du référentiel de procédés

En s'appuyant sur la méta-modélisation de la connaissance sur les procédés (référentiel de procédés) nous disposons des flux entrant et sortant pour chaque activité. Le tableau est créé puis les données y sont organisées comme illustré dans le Tableau V-5.

Activité	Flux entrant	Flux sortant
ID de l'activité	ID du flux entrant	ID du flux sortant
Act1	◆	▲
Act11	◆	●
Act12	●	●
Act13	●	▲
Act111	◆	●
Act112	●	●

Tableau V-5 : Tableau comportant la liste des activités du référentiel de procédés

#### Étape 2 : Connaître les activités qui peuvent être réalisées par des services d'acteur

Dans le cadre de ces travaux, nous disposons du matching réalisé manuellement, il s'agit de la servicisation de l'activité. Les acteurs font correspondre les services qu'ils proposent avec une activité du référentiel des procédés. Pour chaque service, tous les niveaux de granularité de l'activité sont testés. S'il y a correspondance entre l'activité et le service, ce dernier est considéré comme disponible. La liste des services disponibles est consignée dans le tableau comme présenté dans le Tableau V-6. Il est important de noter que cette opération n'a lieu que lorsqu'un nouveau service fait son entrée. En effet, cette connaissance est capitalisée. En revanche, s'il n'y a aucune correspondance entre les services et les activités, quel que soit le niveau de décomposition de l'activité, il y a lieu d'élargir la connaissance sur les procédés (référentiel des procédés), en contactant des experts. Il est également recommandé de faire appel à de nouveaux services.

Activité	Service
ID de l'activité	ID du service
Act1	ST <sub>B</sub> 1
Act11	ST <sub>C</sub> 1
Act12	ST <sub>C</sub> 2
Act13	ST <sub>A</sub> 1
Act111	ST <sub>C</sub> 3

Tableau V-6: Tableau matching activité-service

**Étape 3 : Déterminer la liste des services disponibles en capacité des réaliser des activités**

Une troisième opération consiste à établir une liste des services disponibles en y ajoutant les flux entrants et les flux sortants. Le logigramme (Figure V-9) suivant la démarche.

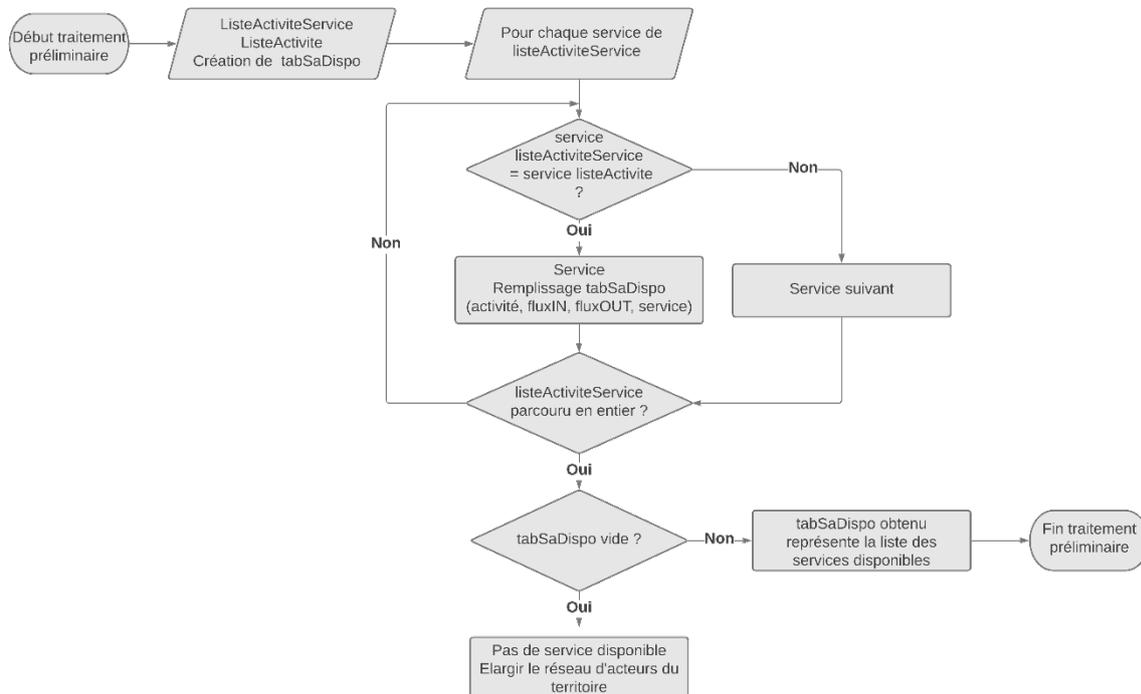


Figure V-9 : Logigramme traitement préliminaire des données

Cette troisième opération aboutit à la construction du Tableau V-7. Il donne les éléments sur lesquels s’appuiera l’algorithme de déduction qui est présenté dans la section suivante.

Activité	Flux entrant	Flux sortant	Service
ID de l’activité	ID du flux entrant	ID du flux sortant	ID du service
Act1	◆	▲	ST <sub>B</sub> 1
Act11	◆	●	ST <sub>C</sub> 1
Act12	●	●	ST <sub>C</sub> 2
Act13	●	▲	ST <sub>A</sub> 1
Act111	◆	●	ST <sub>C</sub> 3

Tableau V-7 : Tableau service activité

V.3.3.2 Algorithme de déduction

À partir du tableau des services disponibles, le but est de déduire la superstructure des alternatives possibles. Cette phase se traduit par la sélection, de manière itérative, des services de transformation pertinents pour une situation donnée. Il y a ici une volonté d’identifier l’ensemble des possibilités (des scénarios) de transformation. Parmi les modes de déduction, le chaînage avant (ou en aval) sera utilisé, à l’instar du mode de raisonnement utilisé dans les travaux de (Al-Ajlan, 2015).

La démarche de déduction est présentée dans le logigramme Figure V-10.

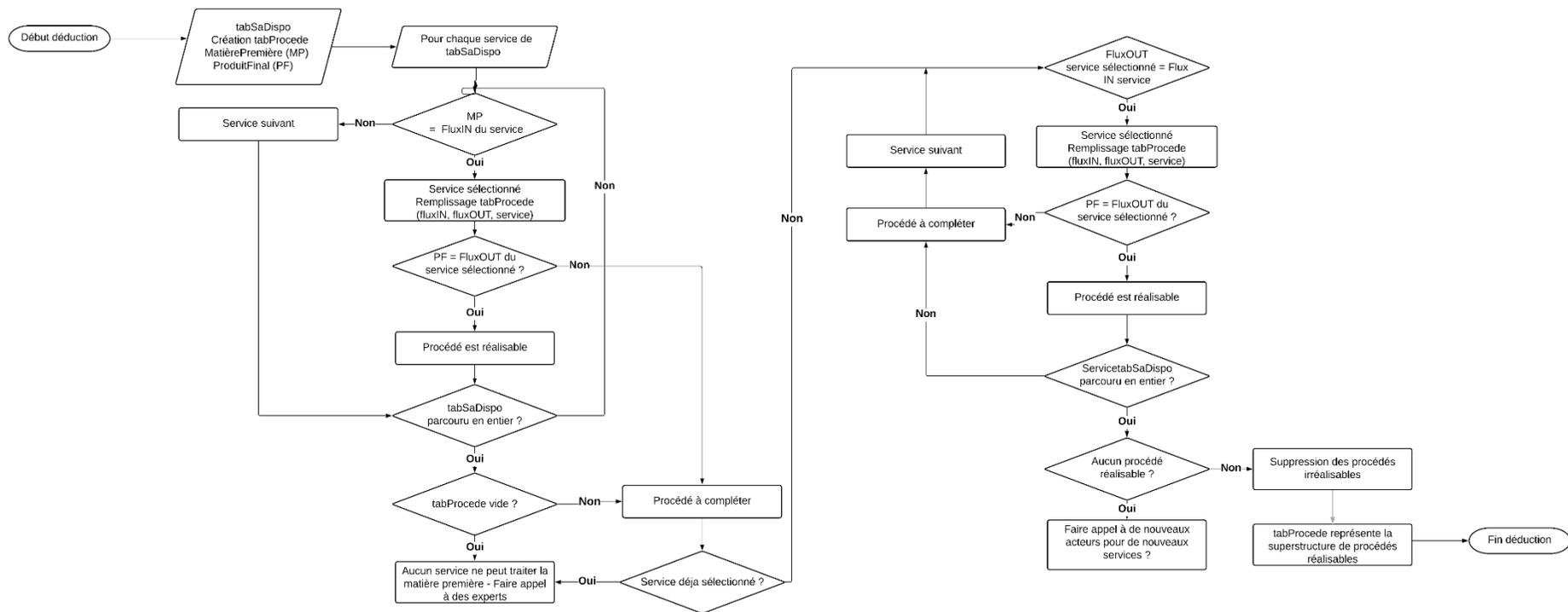


Figure V-10 : Logigramme présentant la logique de déduction de la superstructure de procédé

Elle débute avec l'introduction du tableau de procédés qui supporte la construction de la superstructure. Il est nécessaire de connaître la matière première disponible et le produit final souhaité. Chaque service disponible qui peut traiter la matière première est sélectionné, puis enregistré TabSaDispo du logigramme. Par la suite, pour le flux sortant du service sélectionné, les services restants sont interrogés sur leurs flux entrants. Si le flux entrant est identique au flux sortant, il est enregistré dans le tableau précédent. Ce mécanisme continue jusqu'à ce que tous les services aient été vus comme présenté dans le Tableau V-8. Le chaînage est rendu possible grâce à la cohérence entre les flux de matière. L'annexe 6 contient le pseudo-code commenté de l'algorithme de déduction.

Flux IN	Flux OUT	Service	Flux IN	Flux OUT	Service	Flux IN	Flux OUT	Service	Réalisable
◆	▲	ST <sub>B</sub> 1							Oui
◆	●	ST <sub>C</sub> 1	●	●	ST <sub>C</sub> 2	●	●	ST <sub>A</sub> 1	Oui
◆	●	ST <sub>C</sub> 3							Non

Tableau V-8 : Illustration du contenu de du tableau de procédés

La validation de la superstructure de procédés obtenus dépend de la capacité de chaque procédé (contenus dans la superstructure) à être réalisé entièrement. En d'autres termes, si les services sont en capacité de traiter la matière première jusqu'au produit final.

Deux cas de figures peuvent se présenter :

- Aucun service de transformation n'est en capacité de traiter la matière première ou le procédé est incomplet (tous les services ne sont pas réunis pour transformer la matière première jusqu'au produit final). Dans ce cas, il est alors suggéré d'élargir le réseau d'acteurs pour la proposition de nouveaux services.
- Le procédé est réalisable par un ou plusieurs services

La validité des procédés obtenus repose sur la pertinence du chaînage, c'est-à-dire la manière dont sont sélectionnés les services. Pour éviter une sélection sans fin de service, il est admis qu'un procédé ne peut pas comporter plus d'activités que celles contenues dans le référentiel de procédés. Autrement dit, le référentiel de procédés possède un nombre fini d'étapes ce qui évite une « déduction sans fin ».

À l'issu de cette étape de déduction, la superstructure de procédés obtenue pour notre exemple fil rouge est présentée dans la Figure V-11.

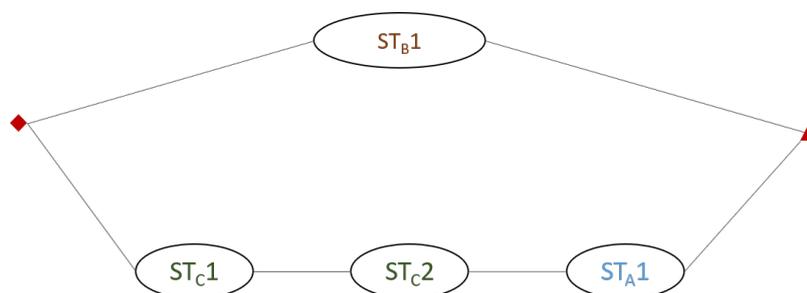


Figure V-11 : Superstructure de procédés

L'étape suivante permet d'aborder la superstructure de procédés non plus sur un point de vue théorique de réalisation fonctionnelle mais sur un point de vue opérationnelle avec l'introduction d'exigences non fonctionnelles.

---

#### V.3.4. Sélection d'une solution opérationnelle avec l'application de filtres

Cette phase effectue un tri des chaînes de transformation résultantes, selon des considérations de distance, de disponibilité et de capacité pour la réalisation du service.

##### V.3.4.1 Filtre spatial

Parmi les procédés déduits de la superstructure, un premier filtre s'applique pour ne sélectionner que ceux qui s'opèrent dans un périmètre géographique donné. Ceci permet de privilégier les structures déjà présentes sur le territoire concerné (de tailles et de fonctionnalités diverses). Cette contrainte spatiale a pour but de limiter la distribution du procédé sur une aire délimitée. Elle se traduit donc par une distance maximale séparant deux services de transformation consécutifs, la localisation de la matière première et le premier service du procédé ainsi que le dernier service et la localisation du lieu de livraison du produit.

Cette distance est variable selon les usages et les pays. Par exemple, en France, selon les experts du secteur, la transformation de la matière peut être considérée comme territoriale, lorsqu'elle s'opère dans un rayon de cinquante kilomètres

##### V.3.4.2 Filtre temporel

Le filtre temporel s'applique au niveau de la superstructure de procédés et au niveau de la chaîne de transformation de la matière. Ce filtre aboutit à la sélection des différentes options possédant un séquençement réaliste, compte-tenu de la disponibilité calendaire des services. De plus, il garantit une certaine fluidité dans l'exécution du procédé, mais aussi le déplacement des flux de l'approvisionnement jusqu'à la livraison finale par des services d'acteurs disponibles. Cet enchaînement tient nécessairement compte des périodes de disponibilité des services de transformation et des services logistiques.

Un point primordial réside dans le fait que la durée calendaire de disponibilité du service doit être supérieure ou égale à la durée théorique minimale de réalisation de l'activité. De plus les services doivent s'enchaîner de manière cohérente, selon un séquençement en accord avec le calendrier de chaque service.

À l'échelle de la chaîne de transformation de la matière, les services de type logistique rentrent en jeu. Du fait de la décentralisation, il ne peut pas être ignoré l'ajout de service de stockage, de transport intermédiaire. Avant même de le sélectionner, il est nécessaire de déterminer quel type de service logistique est approprié pour la gestion du flux considéré. Plusieurs choix sont possibles : le transport seul, le stockage ou encore le transport et le stockage. Ce choix est guidé par les éléments suivants : la localisation de deux services de transformation consécutifs, les acteurs impliqués dans la réalisation de deux services de transformation consécutifs, les services logistiques offerts par les acteurs déjà impliqués dans des services de transformation et enfin la localisation géographique et les dates de disponibilités du service logistique. La démarche de sélection des services logistiques est synthétisée dans les logigrammes suivants.

Le premier s'applique à la sélection de services de transport uniquement (Figure V-12).

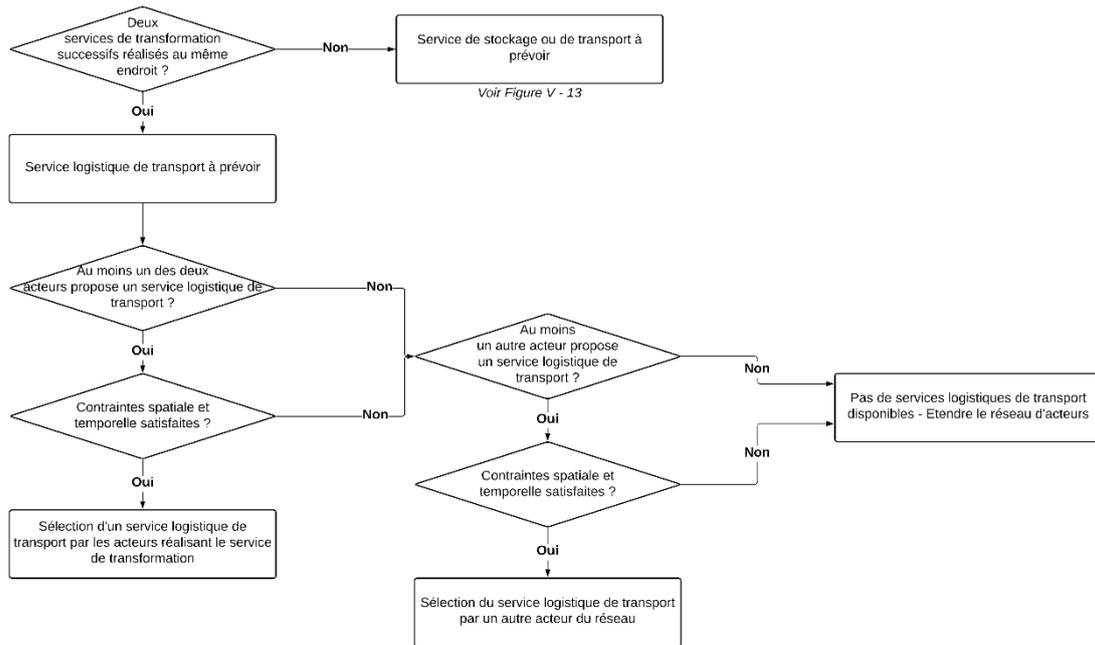


Figure V-12 : Logigramme de sélection du service logistique de transport

Le second s'applique à la sélection de services de stockage et de transport (Figure V-13).

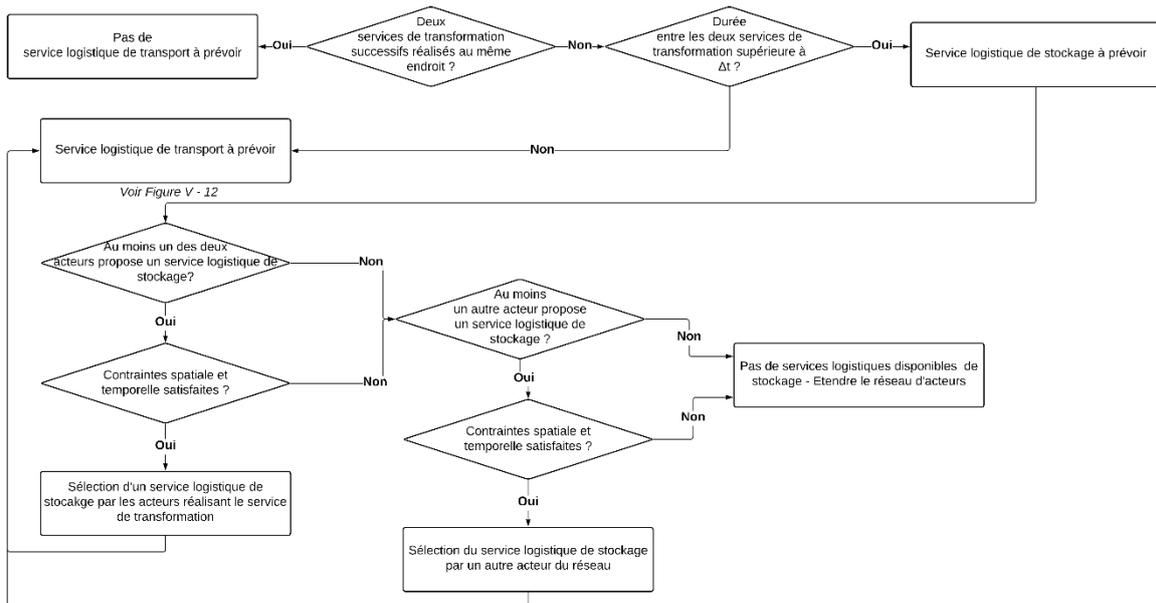


Figure V-13 : Logigramme de sélection du service logistique de stockage et de transport

$\Delta t$  représente le seuil de temps au-delà duquel le service de transport seul ne peut plus être assuré.

### V.3.4.3 Filtres liés aux exigences de production

Chaque service sélectionné, qu'il soit de transformation ou logistique, doit satisfaire des contraintes de production pour maintenir la fluidité et la bonne exécution de la transformation de la matière ainsi que de la logistique. Cela induit plusieurs aspects à prendre en compte : le respect des conditions opératoires, la prise en compte de l'état de la matière et son niveau de dégradation.

Pour ce faire, pour chaque flux, les services de production doivent être en mesure de proposer i) une capacité de production suffisante en masse ou en volume, selon la durée de disponibilité du service et son ordonnancement, ii) le respect des conditions physico-chimiques (température, pression) imposées. Il en va de même pour les services logistiques, et notamment lorsque le flux est immobilisé. Si l'un de ces points ne peut pas être pris en charge par le service, il sera préconisé d'élargir le réseau collaboratif pour trouver de nouveaux services.

La section suivante aborde la modélisation du processus métier à l'issue de l'algorithme de déduction.

#### V.3.4.4 Modélisation du processus métier

La dernière phase du traitement de la connaissance concerne la modélisation de la chaîne de transformation de la matière (Figure V-14) vu sous l'angle métier. Cette étape aide les parties prenantes à avoir la représentation globale de la chaîne de transformation sous un formalisme standard et compris de tous. Cette étape ne sera pas traitée dans le cadre de cette thèse. Néanmoins, les modèles pertinents pour ces travaux ont été mis en évidence.

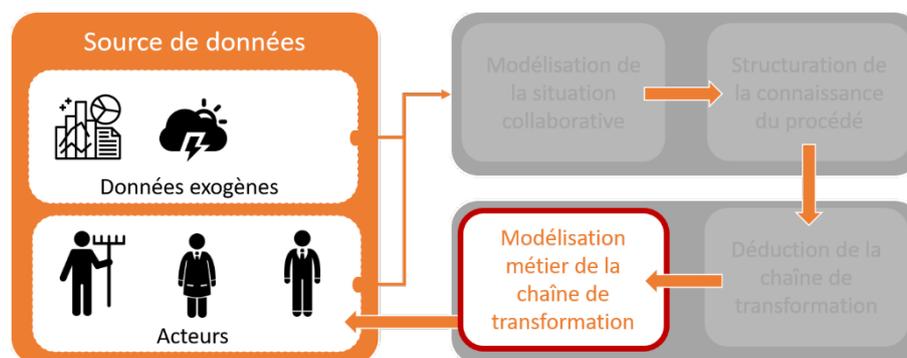


Figure V-14 : Vision du cadre méthodologique outillé centrée sur l'étape de modélisation métier

Les travaux de (Tangkawarow et Waworuntu, 2016) présentent quatre cadres techniques de modélisation standardisée fréquemment utilisée en entreprise Tableau V-9. Chaque technique de modélisation présente des avantages selon l'objectif souhaité vis-à-vis du processus. Il s'avère que le Génie des Procédés fait appel à des processus particulièrement complexes et variables. Le BPMN 2.0 semble la méthode de modélisation la plus appropriée pour notre besoin.

Intitulé (Acronyme)	Description	Avantages	Inconvénients	Pertinence pour l'apport d'agilité
<b>Data Flow Diagram (DFD)</b>	Représentation des flux entrants et sortants du processus Décomposition en sous-systèmes possibles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Facile à comprendre car symboles simples</li> <li>Aide à définir le périmètre du processus</li> </ul>	À cause de son haut niveau d'abstraction, difficile à utiliser pour les processus complexes	+/-
<b>IDEFO Integration Definition For Function Modeling</b>	Représentation des actions, des décisions et des activités d'un processus selon les apports, les résultats, les contrôles et les mécanismes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caractérisation fine de l'activité</li> <li>Décomposition en sous-processus possibles</li> </ul>	Règles de modélisation strictes Plutôt utilisé pour l'analyse que la modélisation d'un processus	-

Intitulé (Acronyme)	Description	Avantages	Inconvénients	Pertinence pour l'apport d'agilité
<b>Diagramme d'activité</b>	Représentation des étapes, des actions et des décisions prises au sein d'un processus	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facile à comprendre</li> <li>▪ Utile pour la phase préliminaire de développement grâce à son haut niveau d'abstraction</li> <li>▪ Parallélisation des activités possibles</li> </ul>	À cause de son haut niveau d'abstraction, difficile à utiliser pour les processus complexes Peu adapté aux collaborations (un acteur la fois)	+
<b>Business Process Modeling and Notation (BPMN 1.0)</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facile à comprendre</li> <li>▪ Approche générique adaptée à la complexité du processus</li> <li>▪ Parallélisation et composition des activités possibles</li> </ul>	Pas de format de fichier unique Possibilité de construire différemment le même système Notation graphique non exécutable (nécessité de passer par BPEL)	++
<b>Business Process Modeling and Notation (BPMN 2.0)</b>	Représentation des flux au fur et à mesure du processus (facilite la coordination des activités et des messages entre les membres du réseau)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Facile à comprendre</li> <li>▪ Approche générique adaptée à la complexité du processus</li> <li>▪ Parallélisation et composition des activités possibles</li> <li>▪ Spécification unique définissant une formalisation et un méta-modèle pour la gestion de processus métier</li> <li>▪ Intégration de diagramme de conversation</li> <li>▪ Permet l'orchestration du processus</li> <li>▪ Compatibilité avec les versions précédentes de BPMN</li> </ul>	Pas de format de fichier unique Possibilité de construire différemment le même système	+++

Tableau V-9 : Tableau de synthèse des méthodes de modélisation selon (Tangkawarow et Waworuntu, 2016)

De manière plus concrète, il peut être pensé un suivi de l'exécution du processus. En effet, l'orchestration du processus, pouvant être soutenue par BPMN 2.0, peut déclencher des actions, comme l'envoi d'information aux acteurs de la chaîne de transformation. Certaines de ces actions peuvent être automatisées (par exemple : mail automatique, alertes calendrier). Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un moteur d'orchestration BPMN 2.0 et d'interfaces (au sens Système d'Information) avec les services de production et les Systèmes d'Information des acteurs. Toutefois, sur ce dernier point, la mise en place technique de ce champ d'application sort du cadre des travaux de thèse.

---

Cette étape de modélisation du processus métier clôture notre proposition de cadre méthodologique outillé. L'ensemble des étapes le constituant forme un outil d'aide à la décision pour la conception de chaîne de transformation de la matière agiles.

## V.4. Conclusion

Ce chapitre a permis de définir les mécanismes de déduction de la logique collaborative pour la déduction de la chaîne de transformation de la matière. Le cadrage de ces mécanismes passe par la détermination d'axes sous-jacents (Figure V-15).

Le premier axe relève des modes de sélection des services, qui sont primordiaux, dans l'optique d'une servicisation du procédé. Pour assurer le bon fonctionnement, les services sélectionnés doivent se conformer à des exigences fonctionnelles (que peut réaliser le service) et des exigences non fonctionnelles (comment le service sera-t-il réalisé ?) en termes de prestation effectuée. Différentes exigences non fonctionnelles pertinentes ont été mises en évidence selon la valeur totale de la prestation d'une entreprise, qu'elle délivre un service ou un produit. Parmi l'ensemble de services existants, les caractéristiques du service offert, son emplacement et la proximité entre les partenaires en sont des exemples pertinents. Le deuxième axe concerne l'adéquation entre l'activité et le service, c'est-à-dire l'équivalence entre une activité dans des conditions de réalisation théoriques et un service d'acteur mettant en jeu un savoir-faire. Cette correspondance activité-service est réalisée directement par les acteurs. Un troisième axe traite de l'enchaînement des services, c'est-à-dire leur séquençement. Il assure un déroulement cohérent des services de l'approvisionnement en matière première jusqu'à la livraison du produit final. L'articulation des axes déterminés précédemment nécessite le développement d'un algorithme de déduction pour la construction du réseau collaboratif. Cette conception de type top-down, s'appuie sur les méta-modèles de l'écosystème du procédé pour un objectif de transformation fixé.

Notre proposition de déduction pour automatiser la conception et l'exécution de la chaîne de transformation en trois grandes étapes. Dans un premier temps, les bases de données relatives aux activités, aux services et aux acteurs sont organisées afin de préciser les services disponibles. Dans un second temps, l'algorithme de déduction automatique détermine la (les) collaboration(s) appropriée(s) selon le contexte et les besoins définis pour valoriser la matière première disponible sur le territoire. Il en résulte une superstructure d'une ou plusieurs alternatives. Enfin, dans un troisième temps les résultats de la déduction sont filtrés selon des critères de distance géographique, de disponibilités temporelles et de contraintes de production. Seuls le ou les alternatives répondant aux exigences non-fonctionnelles sont conservées pour la construction de la ou des chaînes de transformation de la matière résultantes. Ces derniers sont également soumis aux mêmes exigences non fonctionnelles. Dans le cadre de futurs développements, la modélisation BPMN, intéressante pour notre démarche, permettrait non seulement de la modélisation de la chaîne de transformation mais aussi de suivre son exécution. Cela est rendu possible grâce aux capacités d'orchestration de processus inclus dans BPMN 2.0.

Le chapitre suivant s'attachera à mettre en œuvre sur un cas d'étude la déduction de la chaîne de transformation grâce à un outil logiciel. Le cas d'étude s'appliquera à la transformation de la biomasse.

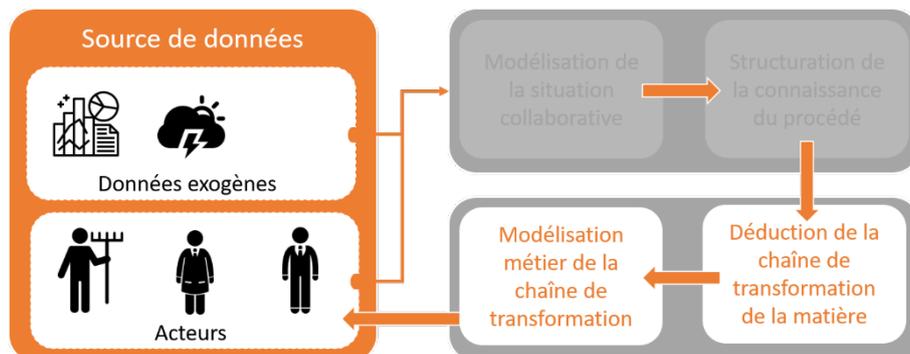


Figure V-15 : Cadre méthodologique détaillé pour la partie traitement de la connaissance

## Chapitre VI. Cas d'étude

---

Ce chapitre a pour objectif de décrire le prototype logiciel implémentant l'algorithme de déduction des chaînes de transformation de la matière. Cet outil sera présenté à l'aide d'un cas portant sur la transformation de la biomasse. Les données réelles, sont basées sur un projet et des chantiers menés dans les Landes.

L'outil logiciel sera présenté dans une première partie, avant de détailler le cas d'étude dans une deuxième partie. Une troisième partie traitera les modèles de la situation collaborative issue du cas d'étude. Enfin, une quatrième partie concernera l'analyse des procédés pertinents puis les chaînes de transformation obtenues. L'ensemble des résultats sera discuté avant de conclure.

## VI.1. Présentation de l'architecture technique de l'outil logiciel

Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous avons voulu faire la preuve de concept du cadre méthodologique présenté dans les chapitres précédents. Ce prototype a été développé sous forme d'une librairie Java<sup>7</sup> (Figure VI-1).

Le prototype logiciel développé met en œuvre l'algorithme de déduction détaillé et s'appuie sur les données présentées dans le Chapitre V. Son périmètre n'inclut pas la réalisation de l'outillage permettant la collecte et la structuration des données suivant les méta-modèles définis au Chapitre IV.

Ces données sont stockées sous forme de fichiers CSV. Outre ces données, l'application prend également en entrée un fichier texte contenant le nom de la matière première à transformer et du produit ciblé. En sortie, le(s) chaîne(s) de transformation réalisables déduites sont fournies. L'application s'appuie sur une base de données contenant les services d'acteurs, les procédés et le matching service étape de transformation. À l'issue de son exécution une feuille de résultats est émise sous forme d'un fichier texte.

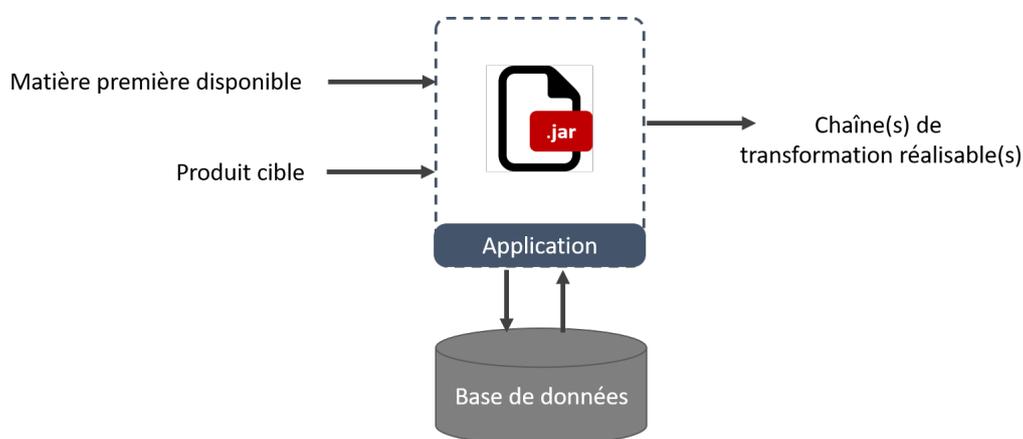


Figure VI-1 : Architecture technique du prototype logiciel

La section suivante détaille le cas d'étude, basé sur des données réelles, support de l'application du prototype.

## VI.2. Présentation des territoires étudiés

Situé dans la région Nouvelle-Aquitaine, le département des Landes recouvre une partie du massif forestier des Landes de Gascogne qui représente le plus grand domaine boisé artificiel d'Europe. Il se compose majoritairement de pins maritimes. Les travaux de (Mesnard, 2019) sur ce département visent à capitaliser de la connaissance au sujet du potentiel de ressources locales dont la valorisation est méconnue, mal ou sous-estimée. Il a été établi que la synergie entre les acteurs du domaine forestier, les citoyens et les acteurs du réseau économique constitue un levier majeur pour favoriser la valorisation du bois (bois d'œuvre, déchets de bois) ainsi que les déchets d'ordures ménagères.

<sup>7</sup> Le code source du prototype est disponible dans un dépôt Git, à l'adresse : <https://gitlab.imft.fr/LGC/arbree>

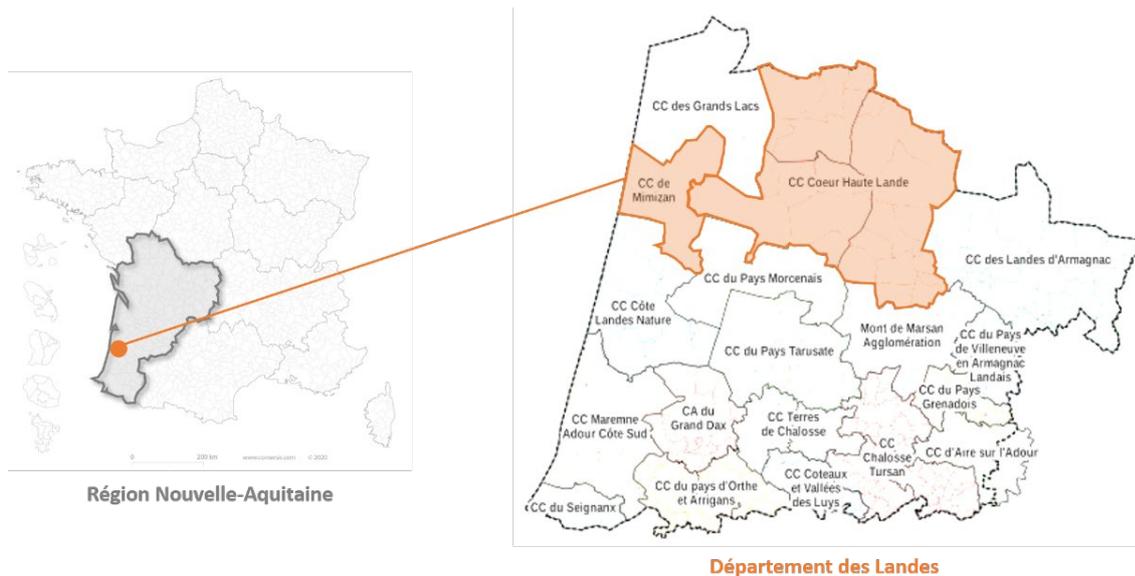


Figure VI-2 : Localisation du cas d'étude

Dans cette dynamique, les communautés de communes du département français des Landes (Communauté de Communes Cœur Haute Lande et Communauté de Communes de Mimizan) situées sur le littoral aquitain (Figure VI-2) recherchent des solutions pour la valorisation des déchets verts des citoyens et d'acteurs économiques de leur territoire, dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau VI-1. La caractérisation de ces deux territoires à l'aide du cadre méthodologique présenté permettra d'identifier les acteurs existants et leurs services associés pour répondre aux opportunités de valorisation de la biomasse locale. De plus, ces connaissances seront utilisées pour construire la (les) chaîne(s) de transformation de biomasse appropriée(s) à la situation territoriale. Notons que ces territoires sont investis dans une démarche Territoire à Energie Positive (TEPOS) démontrant leur intérêt pour la question de la valorisation de la biomasse. Dans cette optique, le prototype logiciel apparaît comme une source de propositions pour l'émergence de nouvelles filières de valorisation.

Nombre de villes	32	Superficie	2146,9 km <sup>2</sup>
Biomasse présente	Au moins 80% de bois Cultures agricoles Déchets ménagers Déchets d'entreprise	Population	27 837 habitants
Type de territoire	Rural	Densité de population	42,6 habitants / km <sup>2</sup>

Tableau VI-1 : Caractéristiques des territoires INSEE 2017

### VI.3. Modélisation de la connaissance de l'écosystème du procédé

#### VI.3.1. Modélisation de la connaissance de la collaboration

##### VI.3.1.1 Mise à disposition des données

Pour modéliser la situation collaborative des territoires étudiés, il est nécessaire de disposer de données pertinentes organisées suivant les différents concepts du méta-modèle de la situation collaborative présenté dans la Figure VI-3. Le but est ici d'instancier ce méta-modèle pour obtenir un modèle de situation propre aux territoires étudiés.

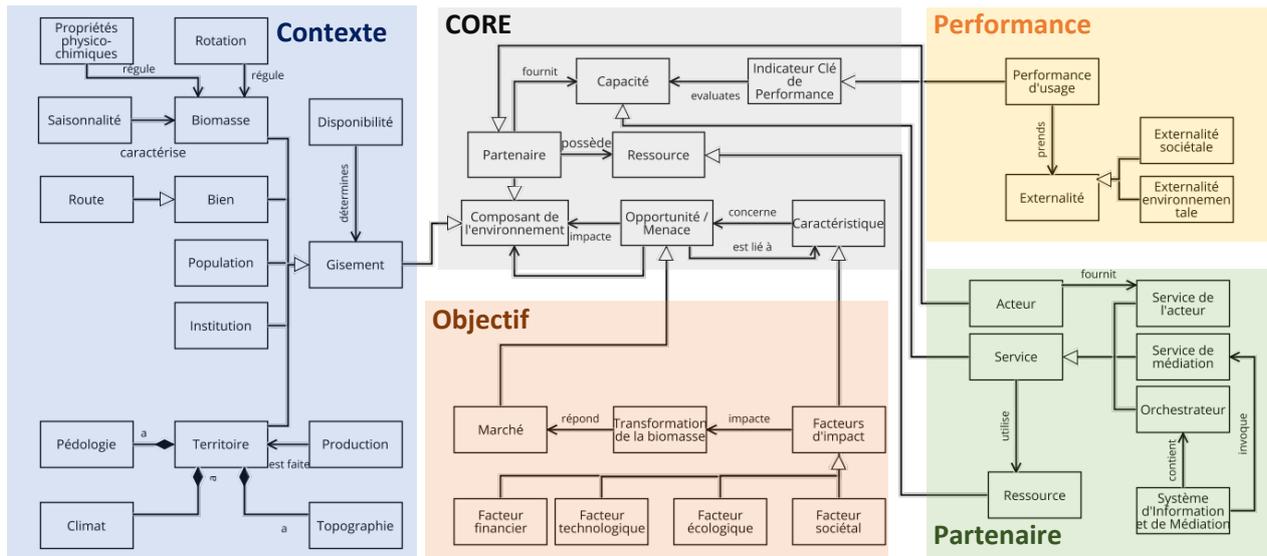


Figure VI-3 : Rappel du méta-modèle de la situation collaborative pour la transformation de la biomasse

Pour y parvenir, une première étape a consisté à identifier les acteurs capables de jouer un rôle dans la transformation de la biomasse. Par la suite, des entretiens semi-directifs menés par un agent territorial ont été organisés individuellement. Ces entretiens ont porté sur :

- L'environnement et les caractéristiques de l'entreprise du point de vue administratif et du point de vue des services proposés,
- Le rôle de l'acteur dans la transformation de la biomasse traitée afin de préciser les activités réalisées actuellement ou prévues ultérieurement,
- La collaboration existante ou possible avec une entreprise à l'intérieur du territoire,
- L'impact de l'activité de transformation pour l'acteur et pour le territoire afin de mettre en évidence les externalités actuelles (positives ou négatives).

L'objectif a été de comprendre l'environnement dans lequel évoluent ces acteurs du secteur de la biomasse. Ces entretiens ont également permis de déterminer les contraintes existantes et les enjeux des territoires.

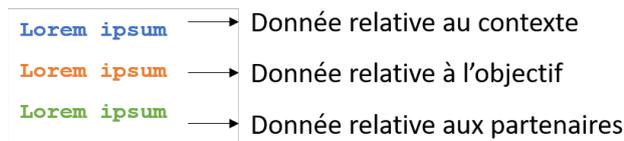
Cette démarche d'entretien a été formalisée dans un guide d'entretien disponible en Annexe 7. Nous avons également mené des entretiens avec les responsables territoriaux et l'entreprise qui les accompagne dans leur projet de valorisation. De plus, l'ensemble des supports techniques ou administratifs permettant de collecter des données ont été utilisés pour compléter les données disponibles (relevés d'entretiens, cahier des clauses techniques particulières et mission d'étude de préfiguration de bâtiments communaux de transformation de la biomasse).

Au regard des données qui ont pu être collectées, ces dernières ont été organisées dans les concepts appropriés, ce qui a permis de s'assurer de la couverture des concepts. En effet, il a été observé que les données pertinentes pouvaient toujours être structurées suivant les concepts du méta-modèle du traitement de la biomasse. Cette démarche a été effectuée manuellement telle que présentée dans la Figure VI-4.

« Le traitement des **déchets verts** représentant un **budget très important** et les **exutoires étant difficiles à trouver**, le **SIVOM des Cantons du Pays de Born** a constitué en 2016 une commission « Croissance Verte » pour trouver des solutions pour **optimiser la gestion des déchets verts**.

Du fait de leur engagement dans la démarche « Territoire à Energie Positive pour la croissance verte » qui inclut la thématique déchets, les **Communautés de Communes de Mimizan et de Cœur Haute Lande** ont été associées à ce travail. Dans le cadre de cette commission, un projet de développement de **plateforme de valorisation des déchets verts** à émergé, plateforme au sein de laquelle les déchets verts peuvent devenir une ressource locale permettant une **production énergétique (méthanisation, bois énergie) et de matière (compost)**. »

*Extrait de « l'Etude de faisabilité d'une plateforme mixte de compostage bois énergie »*



*Figure VI-4 : Recherche de données*

Dans la Figure VI-4, les données collectées concernant le contexte soulignent l'existence d'un gisement de déchets verts sur les territoires. Les institutions locales telles que le SIVOM du Canton de Born et les communautés de Mimizan et de Cœur Haute Lande sont impliquées dans son traitement. Au niveau de l'objectif, il est mis en évidence des raisons financières et techniques pour développer de nouvelles voies de transformation des déchets verts. Les bioproduits souhaités ont une visée énergétique ou matière. Dans cet extrait, la plateforme de valorisation des déchets représente un des acteurs du territoire.

Au final, il en résulte des modèles spécifiques au territoire étudié selon le contexte, les acteurs, les objectifs et la performance. Ils sont présentés dans la section suivante.

#### VI.3.1.2 Modèle du cas d'étude

Le modèle du cas d'étude de la famille de concepts concernant le contexte est présenté dans la Figure VI-5. Environ 15 000 tonnes de déchets verts sont disponibles sur ces territoires par an, ce qui souligne le réel potentiel de valorisation. L'instanciation du contexte révèle que sur ces territoires locaux, le gisement de déchets verts est divisé en deux parties : 40 % de déchets verts ligneux et 60 % de déchets verts non ligneux. Chacune de ces parties comporte des propriétés physico-chimiques et une saisonnalité qui lui sont spécifiques. L'utilisation de ces déchets verts permettrait de ne pas passer à côté d'une ressource dont le territoire peut bénéficier. Différentes institutions territoriales (villes, communautés de communes, autorités locales, établissements publics) sont impliquées dans cet objectif de valorisation des déchets ainsi que du groupe citoyen "SAS Energie Citoyenne Haute Lande". Constitué en Société par Action Simplifiée, ce groupe promeut une démarche participative de l'investissement des citoyens dans le développement des énergies renouvelables locales.

Différents types d'acteurs pertinents pour la valorisation des déchets verts sont présents sur ces territoires (entité publique, agriculteur, prestataire de services environnementaux), ce qui donne lieu à des modèles de situation relatifs à la famille de concepts de Partenaire (Annexe 8). Par exemple, le modèle concernant Monsieur A, agriculteur, est présenté dans la Figure VI-6.

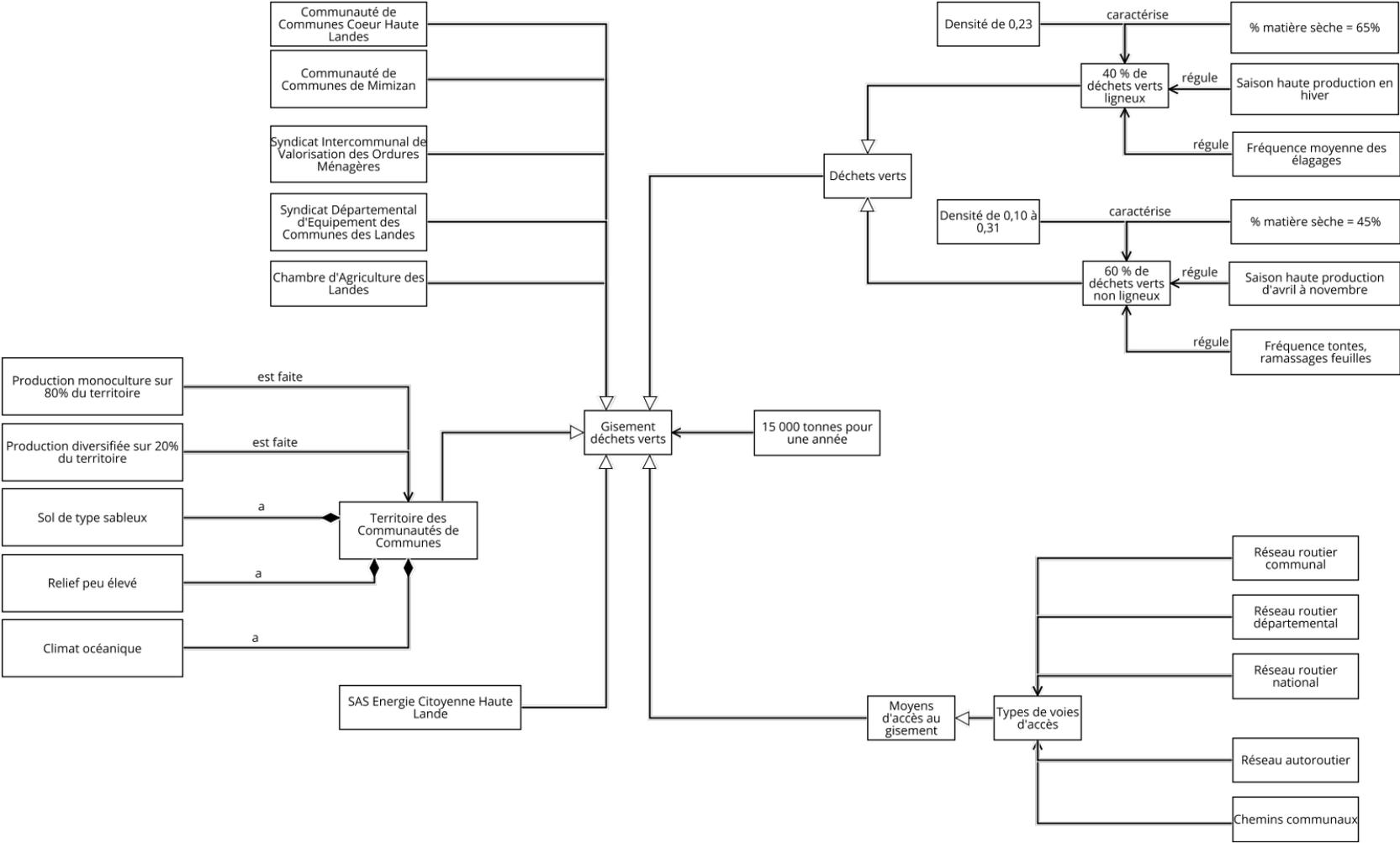


Figure VI-5 : Modèle de situation de la famille de concepts relative au contexte, de l'étude de cas

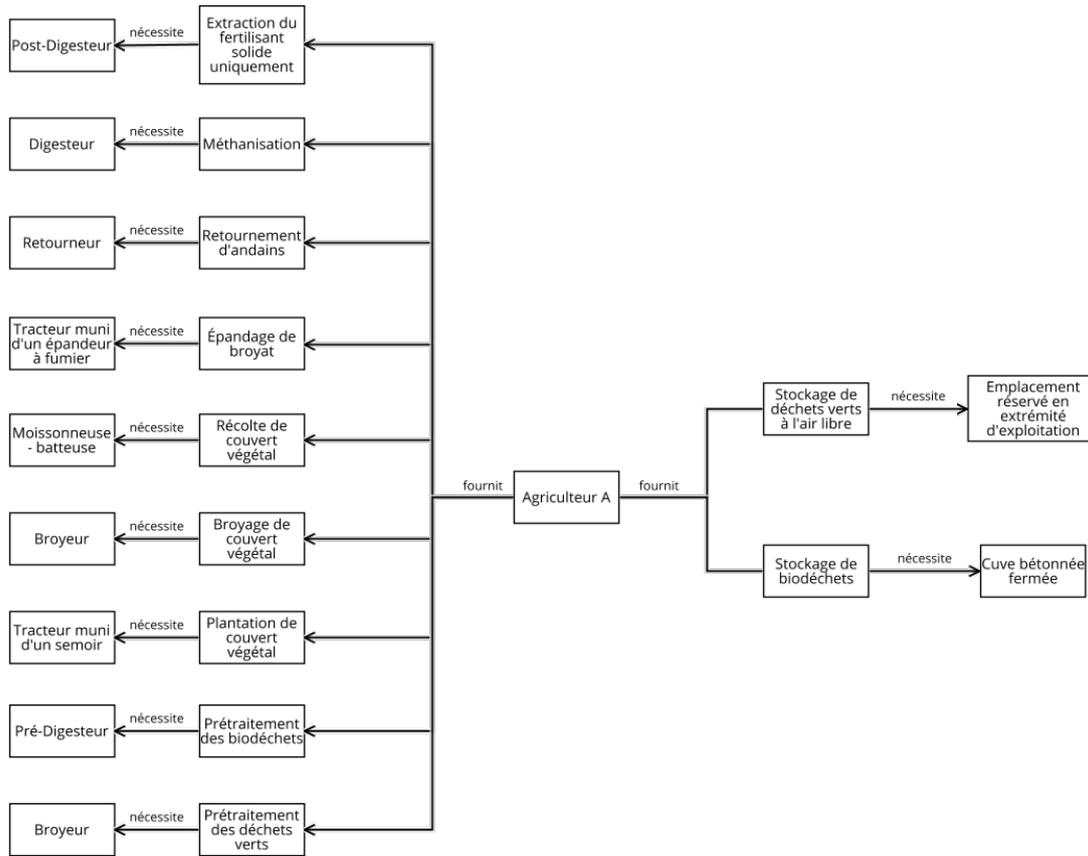


Figure VI-6 : Modèle du partenaire Agriculteur A avec ses neuf services de transformation et ses deux services logistiques

Ces acteurs sont en capacité de fournir des services de transformation et/ou des opérations logistiques de transport ou de stockage synthétisés dans le Tableau VI-2. L'annexe 9 précise les informations administratives de chaque acteur.

Id acteur	Acteur	Description	Nombre de services proposés		
			Transformation	Transport	Stockage
1	Agriculteur A	Profession exerçant des travaux nécessaires à la production de l'élevage ou de la culture céréalière	9	0	2
2	Déchèterie SIVOM Labouheyre	Espace aménagé clos et gardienné permettant aux particuliers (gratuitement) et aux artisans (de manière payante) d'apporter leurs déchets occasionnels (déchets verts, encombrants, déchets dangereux...) et les autres déchets spécifiques en vue de leur valorisation. Gestion effectuée par le Syndicat Intercommunal de Valorisation des Ordures Ménagères (SIVOM).	3	1	1
3	Déchèterie SIVOM Sanguinet		3	1	1
4	EGIS Exploitation	Entreprise d'exploitation et d'entretien d'autoroute	1	0	1
5	LOREKI	Entreprise de valorisation énergétique de biomasse	4	0	1
6	PERRENOT	Entreprise spécialisée dans les transports routiers pour tous types de marchandises en vrac par bennes, par camions remorques dans divers secteurs industriels et de l'agriculture.	2	3	0

Id acteur	Acteur	Description	Nombre de services proposés		
			Transformation	Transport	Stockage
7	Plateforme de valorisation multi-matériaux CCCHL	Plateforme communale de valorisation de la biomasse	10	1	1
8	RTE	Gestionnaire du réseau d'électricité et d'entretien des tranchées forestières sous les lignes haute tension	1	0	1
9	SITA	Entreprise de gestion et d'exploitation de l'eau et des déchets	6	0	1
10	ZETA PELLETS	Entreprise de fabrication de granulés à partir de déchets verts	3	0	1
<b>Nombre total de services : 56 dont</b>			<b>42</b>	<b>6</b>	<b>8</b>

Tableau VI-2 : Description des acteurs du territoire et de leurs services pertinents dans le cadre de la valorisation de la biomasse

L'acteur GASCOGNE Paper identifié initialement comme acteur pertinent ne fournit pas de services pour la valorisation de la biomasse ou de services logistiques. C'est pourquoi il n'apparaît pas dans le Tableau VI-2. En revanche, il est noté que cet acteur est en capacité de fournir de l'énergie issue de la chaleur fatale de ses activités. Cette information pourrait être utilisée dans les prochaines versions de l'algorithme de déduction afin de prendre en compte l'énergie nécessaire à la transformation. Ainsi, la fourniture d'énergie pourrait être incluse dans le processus collaboratif. De fait, il s'agit d'un autre type de collaboration qui vient s'ajouter à celle dont l'objectif est de transformer la matière.

Pour les besoins de ces travaux de thèse, l'acteur 10 a été ajouté bien qu'il se trouve en dehors du périmètre étudié. En effet, il possède des services de transformation en cohérence avec les objectifs de valorisation des territoires considérés dans le cas d'étude.

Une rapide analyse de la répartition du nombre de services pouvant réaliser une activité de transformation (Tableau VI-3) montre qu'il y a de la concurrence entre différents services pour une même activité. C'est le cas des activités de broyage, de coupe et de fourniture des déchets verts, par exemple. La sélection du service de transformation le plus approprié à la situation considérée nécessite alors l'utilisation de facteurs non fonctionnels.

Activité		Service		Activité		Service	
Id activité	Description	Nombre	Id acteurs	Id activité	Description	Nombre	Id acteurs
11	Fourniture de déchets verts	3	1, 2, 3	51	Production de biogaz	1	1
12	Prétraitement des déchets verts	1	9	53	Compression et distribution du GNC	1	6
13	Digestion aérobie	3	5, 7, 9	111	Coupe de déchets verts	2	4, 8
14	Criblage du compost	2	5, 7	112	Collecte de déchets verts	1	9

Activité		Service		Activité		Service	
Id activité	Description	Nombre	Id acteurs	Id activité	Description	Nombre	Id acteurs
15	Mise aux normes	3	5, 7, 9	121	Tri des déchets verts non ligneux	2	2, 3
22	Prétraitement des biodéchets	1	1	122	Broyage de déchets verts pour le compostage	3	5, 7, 9
23	Digestion anaérobie	1	1	123	Ajout matière organique carbonée	1	7
24	Séparation des phases - Fertilisant	1	1	124	Mélange de broyat de déchets verts	1	7
34	Séchage plaquettes	1	7	131	Mise en andain, retournement et aération	2	1, 7
35	Criblage des plaquettes	1	7	341	Séchage granulés	1	10
36	Mise aux normes et conditionnement des plaquettes	1	7	1211	Tri des déchets verts ligneux	2	2, 3
41	Pelletisation	1	10	1221	Déchetage de déchets verts ligneux	1	7
42	Mise aux normes et conditionnement des granulés	1	10	1222	Broyage de déchets verts pour granulés	1	7

Tableau VI-3 : Tableau du nombre de services pouvant réaliser une activité du référentiel de procédés

Le modèle de l'objectif du cas d'étude est présenté dans la Figure VI-7.

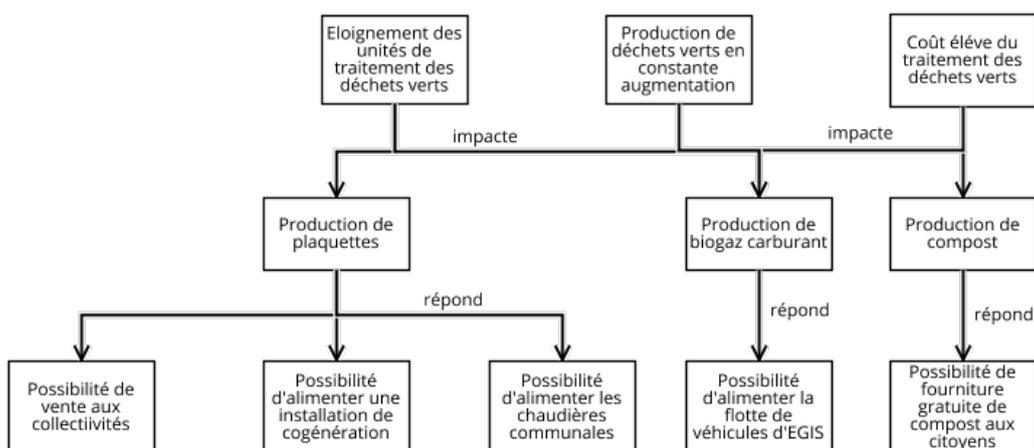


Figure VI-7 : Modèle de l'objectif de l'étude de cas

En ce qui concerne l'instanciation des concepts relatifs à l'objectif, la Figure VI-7 montre que l'objectif principal "Valorisation des déchets verts" peut répondre à différentes options de valorisation. Les bioproduits ciblés sont le compost, les plaquettes et le biogaz carburant. Ces derniers sont influencés par des facteurs d'impact. Un facteur financier découle du coût de traitement élevé des déchets verts. Ce facteur est en lien avec un facteur du type sociétal. Ce dernier correspond à

l'accroissement de la production de déchets verts par les citoyens ainsi que les entreprises présentes sur ces territoires depuis 2010. De plus, l'éloignement des unités de traitement fait référence à un facteur technique mettant en évidence une absence d'équipements dédiés à la valorisation des déchets verts au sein des territoires du cas d'étude. Ces différentes options de valorisation répondent à des besoins réels identifiés sur le territoire que ce soit au niveau des équipements de la collectivité ou encore des citoyens.

Le modèle de performance du cas d'étude est présenté dans la Figure VI-8.

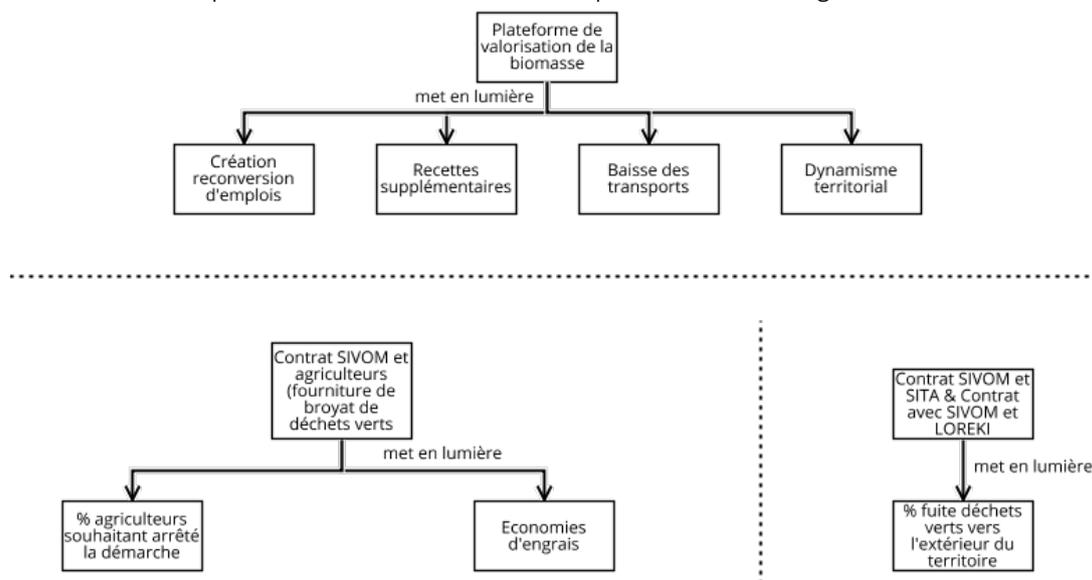


Figure VI-8 : Modèles de performance de l'étude de cas

La plateforme de valorisation de la biomasse générerait des externalités positives, comme évalué dans l'étude de préféabilité réalisée par les territoires de la Communauté de Communes Cœur Haute Lande et de la Communauté de Communes de Mimizan. En effet, ces externalités se rapportent à la création et/ou la reconversion d'emplois et des recettes supplémentaires liées à la vente éventuelle de compost auprès d'autres collectivités. En effet, cette plateforme sera située dans la Communauté de Communes Cœur Haute Lande. Cette installation contribue également à une certaine dynamique territoriale dans la mesure où elle développe une nouvelle activité locale dont les produits sont destinés à des établissements publics (écoles, mairie) ou encore les citoyens. La performance à atteindre par certaines parties prenantes comme le SIVOM et les agriculteurs est déterminée par contrat.

### VI.3.1.3 Analyse de la modélisation de l'environnement de la collaboration

Les modèles obtenus donnent une vision claire des parties prenantes, de l'objectif poursuivi sur les territoires considérés, de la biomasse disponible ainsi que des enjeux et des contraintes associés. Ainsi, ils fournissent une connaissance de l'environnement nécessaire pour la mise en place d'une chaîne de transformation de la biomasse.

Cependant, la représentation de l'écosystème nécessite une certaine connaissance du territoire d'un point de vue environnemental, économique et social. C'est pourquoi, il peut être envisagé de réaliser cette représentation de manière co-construite en y associant les porteurs de projet, les décideurs mais également des parties prenantes du territoire. Le choix de n'avoir représenté que les acteurs pertinents est une facilité à but pédagogique pour le cas d'étude. Toutefois, bien plus que l'identification des acteurs selon les objectifs au cas par cas, le but final est d'identifier tous les acteurs. La pertinence des services proposés par chacun d'entre eux sera recherchée avec les différents filtres de l'algorithme.

Par ailleurs, la modélisation de l'écosystème telle que proposée dans ces travaux de thèse, n'intègre pas l'automatisation de la collecte et de l'exploitation de données en temps réel telles que la fluctuation des prix de la matière première disponible, les variations météorologiques et leur influence sur les dates de récolte et les propriétés physico-chimique de la biomasse ou encore l'évolution de la circulation routière pouvant impacter les trajets logistiques. Une évolution dans ce sens est particulièrement intéressante compte-tenu de l'augmentation du nombre d'objets connectés (Internet des Objets) et du volume de données générées (Big Data), notamment dans un contexte d'évolution de l'Agriculture 4.0.

### VI.3.2. Modélisation de la connaissance sur les procédés

#### VI.3.2.1 Contenu du référentiel sur les procédés

Dans le cadre de ces travaux de thèse, le référentiel sur les procédés comprend cinq procédés pour lesquels la matière première et le produit final sont précisés dans le Tableau VI-4. Dans cette phase de preuve de concept que nous développons, le référentiel n'a été alimenté qu'avec des procédés directement en lien avec le cas d'étude. Il est à noter que ce référentiel de procédés est amené à être enrichi par d'autres procédés de transformation de la biomasse dans le futur.

Procédé	Matière première	Produit final	Références bibliographiques
Compostage	Déchets verts	Compost	(ADEME, 2015) (Rynk et al., 1992)
Méthanisation par voie humide	Biodéchets	Fertilisant solide brut	(Nizami et al., 2009)
Fabrication de granulés	Déchets verts	Granulés de déchets verts	(Stelte et al., 2012) (Malik et al., 2015) (Garcia-Maraver et al., 2015) (Pradhan et al., 2018) (Younis et al., 2018)
Fabrication de plaquettes	Déchets verts	Plaquettes	(ADEME, 2014) (ADEME, 2008)
Fabrication d'agrocarburant par méthanisation	Biodéchets	GNC (Gaz naturel compressé pour véhicule)	(Surendra et al., 2015) (Ullah Khan et al., 2017) (Sun et al., 2015) (C. Chen et al., 2016)

Tableau VI-4 : Procédés compris dans le référentiel de procédés

Les procédés qui composent actuellement ce référentiel ont pour principal objectif de valoriser la biomasse soit en un amendement agronomique (compost, fertilisant), soit de manière énergétique (granulé, plaquette, GNC). Ils mettent en jeu la transformation de la biomasse de type lignocellulosique comme le bois et les déchets verts. Il est à noter que les biodéchets sont constitués des déchets alimentaires et des déchets verts. L'objectif et la finalité de chaque procédé sont présentés dans le paragraphe suivant.

Le compostage est un procédé biologique aérobie où la matière organique, dont les déchets verts, fermentent sous l'action des microorganismes. Dans des conditions d'humidité, température, de granulométrie et de ventilation appropriées, le compostage aboutit à un amendement organique riche pour le jardinage ou la culture. À l'inverse du compostage, la méthanisation est un procédé de fermentation anaérobie. Il existe deux principales variantes du procédé de méthanisation en fonction

de la teneur en matière sèche : par voie humide (avec l'utilisation d'une biomasse principalement liquide : boues de stations d'épuration, lisiers, ...) et par voie sèche (avec l'utilisation d'une biomasse principalement solide : fumier, paille, ...). Pour ces travaux, nous avons intégré le procédé par voie humide, déjà en place sur le territoire. À l'issue de la méthanisation, du biogaz et du digestat sont générés. Ce dernier peut constituer un fertilisant solide ou liquide. Parmi les différents procédés permettant d'obtenir du Gaz Naturel Compressé (GNC), nous avons opté pour la méthanisation par voie humide. Elle donne lieu à des étapes de séparation des constituants du biogaz avant une purification du méthane. La fabrication de plaquettes ou de granulés implique des activités de transformation physique de la composante ligneuse de la biomasse par broyage ou déchiquetage. Contrairement aux plaquettes, les granulés sont mis en forme avant d'être tamisés. Le combustible obtenu est destiné à alimenter les chaudières industrielles ou de particuliers selon des conditions d'humidité et de granulométrie établies. Le détail des activités ainsi que des flux entrants et sortants sont contenus dans l'Annexe 10.

### VI.3.2.2 Modélisation de la connaissance sur les procédés

Pour chaque procédé, les données pertinentes ont été recherchées dans la littérature pour alimenter les concepts du méta-modèle de la connaissance sur le procédé présenté dans la Figure VI-9.

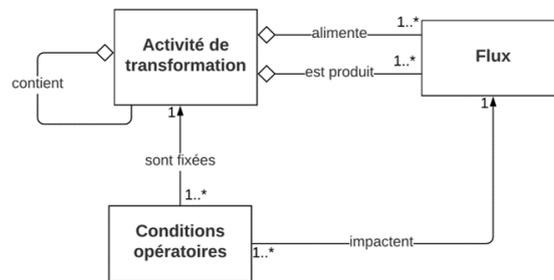


Figure VI-9 : Rappel du méta-modèle de la connaissance du procédé

La Figure VI-10 illustre le modèle obtenu pour le procédé de fabrication de bio-méthane. La dénomination des activités de transformation est en accord avec les termes retrouvés dans la bibliographie et les termes utilisés sur le terrain, d'un point de vue métier.

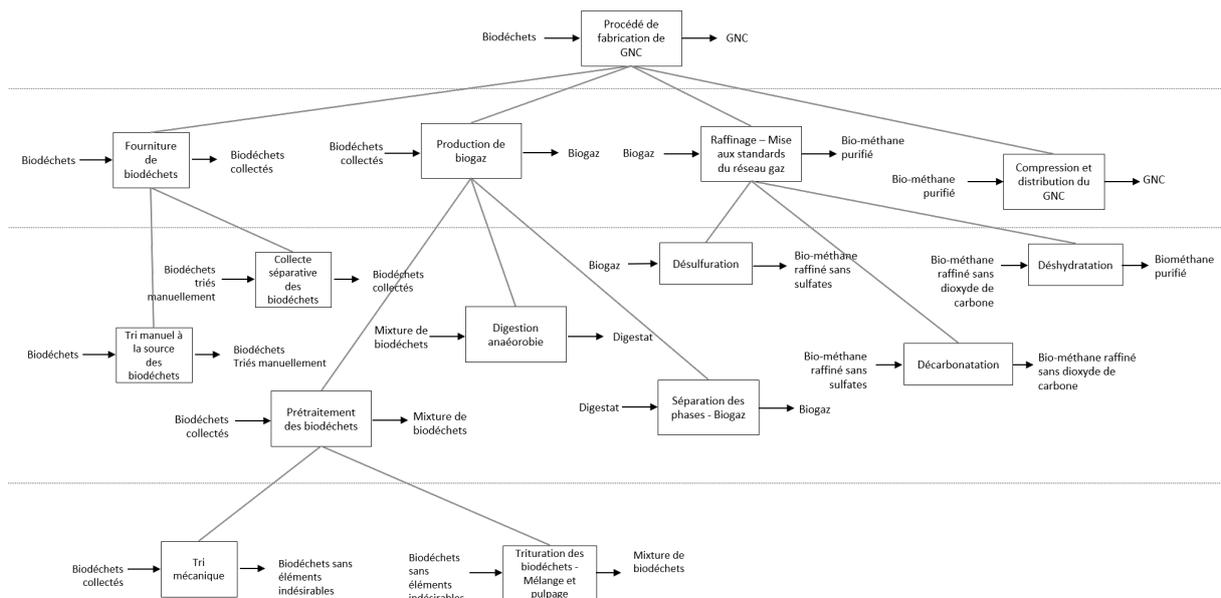


Figure VI-10 : Procédé de fabrication de GNC selon le méta-modèle de référence du procédé

La décomposition du procédé en activités de transformation, selon différents niveaux de granularité, est visible sur la Figure VI-10. Chaque niveau de granularité est délimité par une ligne pointillée. Les conditions opératoires concernant le procédé de fabrication du bio-méthane n'ont pas été ajoutées sur le modèle afin de ne pas le surcharger, mais synthétisées dans des tableaux.

Le Tableau VI-5 concerne les caractéristiques physico-chimiques des flux.

ID flux	nom_flux	pH	% matière sèche	P bar	T (°C)	% CH4	%CO2	%H2O	ppm H2S
201	Biodéchets	6,5 - 8,5	< 15		ambiante				
204	Mélangede biodéchets	6,5 - 8,5	< 15		ambiante				
205	Digestat								
206	Biodéchets collectés	6,5 - 8,5	< 15		ambiante				
502	GNC			200 - 250		> 95		< 3	
503	Biogaz				45 - 60	50 - 75	25 - 50	40 - 90	
504	Bio-méthane purifié								< 1000
505	Bio-méthane raffiné sans sulfates							40 - 90	< 1000
506	Bio-méthane raffiné sans dioxyde de carbone							40 - 90	< 1000

Tableau VI-5 : Exemples de caractéristiques physico-chimiques des flux du procédé de fabrication de bio-méthane

Le Tableau VI-6 contient les conditions opératoires des activités.

Id activité	Nom activité	Ressources matérielles	Paramètres de contrôle	T (°C)
5	Procédé de fabrication de GNC			
21	Fourniture de biodéchets	Bac de collecte spécifique Benne de collecte spécifique	% erreurs de tri	
51	Production de biogaz	Équipements pour la méthanisation par voie sèche	Température Pression Temps de rétention	
52	Raffinage – Mise aux standards du réseau	Systèmes d'épuration membranaire	Réglages du réseau de captage % CH4	
53	Compression et distribution du GNC	Compresseur ou module de compression Bornes de distribution Réseau de gaz	Pression	
22	Pré-traitement des biodéchets	Pré-digester Cuve d'incorporation		
23	Digestion anaérobie	Digester	Temps de rétention	35 – 40 (mésophile)

Id activité	Nom activité	Ressources matérielles	Paramètres de contrôle	T (°C)
			Qualité du brassage Régularité des apports	50 – 65 (thermophile)
512	Séparation des phases – Biogaz	Post digesteur	% CH4	
521	Désulfuration	Système de désulfuration	Ppm H2S	
522	Décarbonatation	Système de décarbonatation	% CO2	
523	Déshydratation	Déshydratation	% H2O, % O2	

Tableau VI-6 : Caractéristiques opératoires des activités de fabrication de bio-méthane

### VI.3.2.3 Analyse de la modélisation de la connaissance sur les procédés

Les modèles de procédés fournissent la connaissance nécessaire en termes d'activités de transformation, de flux, de conditions opératoires et de la construction du processus collaboratif. La clarté et la précision de la description des activités de transformation est primordiale pour que l'acteur puisse évaluer sa propre capacité de réalisation.

L'activité d'approvisionnement en matière première a été ajoutée dans le périmètre du procédé. En effet la matière première requiert une activité qui vient modifier sa structure physique avant d'intégrer le procédé. Sur ce point, la manière dont la récolte est effectuée peut impacter sa capacité à se dégrader dans le temps.

Nous constatons qu'il est nécessaire que cette phase de modélisation soit réalisée par des experts. La diversité couplée à la complexité de certains procédés requiert un savoir technique spécifique. La création de chaîne de transformation de la matière relève d'expérimentations ou de simulations effectuées dans des conditions expérimentales bien déterminées. Ce qui fait l'originalité de notre approche est de pouvoir y associer des services qui peuvent répondre à ces conditions, alors même qu'ils ne sont pas proposés par un même acteur et/ou regroupés en un même lieu.

Ainsi, d'un point de vue métier, ce qui prime ici est de s'assurer que les conditions opératoires décrites dans la littérature sont respectées par les services de transformation. Cela passe par la mesure de données et leur contrôle via les équipements que possèdent les acteurs. Il s'agit par exemple de la température, de la pression, du taux d'humidité etc. Pour chaque procédé de transformation, il existe plusieurs variantes. Cela est dû notamment à l'utilisation de matériels différents et de technologies différentes, de l'aspect physico-chimique de la matière première (granulométrie, teneur en eau, etc.) mais surtout du type d'activité impliqué. C'est pourquoi afin de garder une certaine généralité et couvrir un large spectre de variantes, des plages et non des valeurs exactes sont présentées dans les Tableaux VI-5 et VI-6. Ces paramètres influent sur la durée totale de transformation jusqu'à l'obtention du bioproduit ainsi que sur le rendement de la transformation.

Le référentiel sur les procédés doit être tenu à jour régulièrement. À noter que l'ajout d'un nouveau procédé doit entraîner une étape de correspondance avec les services des acteurs répertoriés. La modélisation de l'écosystème du procédé nous fournit la connaissance pertinente pour alimenter l'étape de la déduction du processus collaboratif.

## VI.4. Étape de déduction à l'aide du logiciel : application au cas d'étude

La déduction de (des) procédé(s) pertinent(s) et de la (des) chaîne(s) de transformation qui en résulte(nt) passe par les étapes précédemment détaillées dans le Chapitre V, c'est-à-dire une phase de traitement préliminaire intégrant la collecte et l'organisation des données, une phase de déduction des procédé(s) pertinent(s) et une phase de filtre et sélection des solutions pouvant déboucher sur une ou plusieurs chaîne(s) de transformation.

### VI.4.1. Traitement préliminaire des données

Le référentiel de procédés présenté ici comporte quarante-sept activités dont la liste complète est présentée dans l'Annexe 11. Les flux entrants et sortants pour chaque activité sont mis en évidence, comme présenté dans la Figure VI-11.

<b>Id activité</b>	<b>Nom activité</b>	<b>Flux entrant</b>	<b>Flux sortant</b>
1	Procédé de compostage	Déchets verts	Compost normé
2	Procédé de méthanisation par voie liquide	Biodéchets	Fertilisant solide brut
3	Procédé de fabrication de plaquettes de déchets verts	Déchets verts	Plaquettes de déchets verts conditionnées
4	Procédés de transformation de granulés	Déchets verts	Granulés normés et conditionnés
5	Procédé de fabrication de GNC	Biodéchets	GNC
6	Fourniture de déchets verts	Déchets verts	Déchets verts collectés
7	Prétraitement des déchets verts	Déchets verts collectés	Mélange équilibré carbone azote
8	Digestion aérobie	Mélange équilibré carbone azote	Compost mûr
9	Criblage du compost	Compost mûr	Compost mûr homogène
10	Mise aux normes	Compost mûr homogène	Compost normé
11	Fourniture des biodéchets	Biodéchets	Biodéchets collectés
12	Prétraitement des biodéchets	Biodéchets collectés	Mixture de biodéchets
13	Digestion anaérobie	Mixture de biodéchets	Digestat
14	Séparation des phases - Fertilisant	Digestat	Fertilisant solide brut
15	Tri manuel à la source des biodéchets	Biodéchets	Biodéchets triés manuellement

Figure VI-11 : Extrait du référentiel de procédés utilisé pour le cas d'étude

Comme présenté dans la description de l'algorithme (cf. Chapitre V), les activités de transformation recherchées sont celles participant à des procédés permettant de transformer la matière première source ① (ici les déchets verts) en de(s)produit(s) cible(s) ② (ici les plaquettes, le compost et le GNC) (Figure VI-12).

```
24 Flux matierePremiere = new Flux();
25 matierePremiere.setfID("101");
26 matierePremiere.setfNom("Déchets verts"); } ①
27 Flux produitFinal = new Flux();
28 produitFinal.setfID("102");
29 produitFinal.setfNom("Compost normé"); } ②
30 donnee.setMatierePremiere(matierePremiere);
31 donnee.setProduitFinal(produitFinal);
32
```

Figure VI-12 : Capture d'écran du code du logiciel portant sur la recherche d'activités pertinentes avec l'exemple des déchets verts en matière première et du compost normé en produit final

Par ailleurs, tout autre procédé de transformation prenant des déchets verts en entrée sera recherché. Cette stratégie permet de ne pas passer à côté d'opportunités de transformation qui n'auraient pas été identifiées. Il en découle trois procédés pour lesquels deux possèdent les flux entrants et sortants correspondant au cas d'étude et un ne possède que le flux entrant. Il s'agit des procédés de compostage, de fabrication de plaquettes et de fabrication de granulés (Tableau VI-7). La production de GNC par méthanisation par voie liquide requiert un mélange de biodéchets liquide en flux entrant. Or, cette matière première n'est pas ciblée à l'heure actuelle pour les décideurs. Ceci explique pourquoi le procédé de fabrication d'agrocarburant n'est pas retenu par l'algorithme. Quant au procédé de

fabrication de granulés, il n'était pas une des options de valorisation envisagées au préalable par les décideurs. Ainsi, il est ainsi intéressant de souligner que toutes les opportunités de transformation sont proposées par l'algorithme, permettant de s'ouvrir vers toutes les possibilités de valorisation (selon le contenu du référentiel de procédés). Pour ces nouvelles opportunités, il faudra néanmoins s'assurer que le bioproduit répond à un besoin et/ou un marché et que la transformation est rentable. Ainsi, l'ajout d'une activité de fourniture de biodéchets incluant des contenants de tri spécifiques et une collecte dédiée auprès de la restauration collective pour des déchets alimentaires, des stations d'épurations territoriales pour les boues ou encore les agriculteurs pour le lisier changeraient la donne. D'autant plus que la collecte des biodéchets auprès des gros producteurs (plus de dix tonnes de biodéchets par an) est une obligation réglementaire depuis 2016. Cet ajout permettrait d'obtenir du fertilisant solide brut particulièrement intéressant pour l'enrichissement des sols agricoles, pauvres en matières organiques dans cette zone géographique. En plus de cette activité de transformation, l'investissement dans une unité de raffinage de biogaz pourrait aboutir à la production de GNC local. Il est alors possible de faire émerger des voies de valorisation de la biomasse territoriale auprès des décideurs moyennant l'investissement dans de nouvelles activités de transformation et/ou la sollicitation de nouveaux acteurs.

Procédé du référentiel de procédés	Matière première	Produit final	Procédé pertinent
Compostage	Déchets verts	Compost	Oui
Méthanisation par voie humide	Biodéchets	Fertilisant solide brut	Non
Fabrication de granulés	Déchets verts	Granulés de déchets verts	Oui
Fabrication de plaquettes	Déchets verts	Plaquettes	Oui
Fabrication d'agrocarburant	Biodéchets	GNC	Non

*Tableau VI-7 : Pertinence des procédés contenus dans le référentiel de procédés en fonction de la matière première et du produit final*

Pour chaque procédé candidat, la superstructure de procédés est détaillée, c'est-à-dire le nombre d'alternatives théoriques différentes pour exécuter le procédé (Tableau VI-8).

Procédé potentiellement possible pour le cas d'étude	Compostage	Fabrication de granulés	Fabrication de Plaquettes
Superstructure du procédé (nombre d'alternatives de transformation théoriques)	9	9	3

*Tableau VI-8 : Superstructures possibles du cas d'étude*

Un exemple de superstructure est donné en Annexe 12 avec le procédé de compostage.

Il est alors temps de rechercher la correspondance entre les activités de transformation et les services de transformation de la base de données. On filtre les services de transformation à utiliser par rapport aux activités de transformation du procédé retenu. Le Tableau VI-9 comprend un extrait des services de transformation disponibles proposés par l'agriculteur.

Id activité	Nom activité	Id service	Nom service	Acteur
11	Fourniture de déchets verts	2	Récolte de couvert végétal	Agriculteur A

Id activité	Nom activité	Id service	Nom service	Acteur
22	Prétraitement des biodéchets	8	Prétraitement des biodéchets	Agriculteur A
23	Digestion anaérobie	6	Méthanisation	Agriculteur A
24	Séparation des phases - Fertilisant	9	Extraction fertilisant solide uniquement	Agriculteur A
51	Production de biogaz	6	Production de biogaz	Agriculteur A
131	Mise en andain, retournement et aération	5	Retournement d'andains	Agriculteur A

Tableau VI-9 : Liste des services de l'Agriculteur A pouvant réaliser une activité du procédé retenu

En disposant des superstructures des procédés pertinents et de la liste des services de transformation disponibles, la déduction de procédé(s) pertinents constitue la prochaine étape.

#### VI.4.2. Déduction des procédés pertinents et des chaînes de transformation

Pour le cas d'étude, les hypothèses de travail fixées sont détaillées ci-dessous :

- Le temps de travail s'étend sur 24h.
- L'année considérée est 2020.
- La plage de temps couvre une année civile.
- Il est possible de prendre en compte des jours non travaillés (jours fériés et week-ends dans le cas d'étude).
- Le compost, les granulés et les plaquettes sont mis à disposition au plus tôt.
- Les déchets verts des riverains et ceux gérés par les collectivités sont directement acheminés vers les déchèteries (en apport volontaire).
- Les territoires disposent de la juste quantité pour que le service de transformation puisse réaliser l'activité. Il en est de même pour les services logistiques.
- La capacité de production de chaque service est nécessaire et suffisante pour traiter le flux entrant.
- La dégradation des flux de matière ne permet plus leur utilisation quinze jours après avoir été produits.

Dans un premier temps, il est admis que

- Les déchets verts sont disponibles toute l'année.
- Les services des acteurs sont disponibles toute l'année, sans interruption.

Les résultats obtenus sont consignés dans le Tableau VI-10.

Nombre possible de	Compost	Granulés	Plaquettes
Procédés pertinents	945	10	10
Chaînes de transformation	22023	51	51

Tableau VI-10 : Résultats de la déduction du (des) procédé(s) pour le cas d'étude

Les résultats soulignent un nombre conséquent de procédés pertinents possibles, notamment pour le compostage. Ce procédé compte vingt-sept services de transformation en capacité d'exécuter des activités relatives au compostage dont vingt-cinq services possédant des exigences fonctionnelles similaires. De plus, lorsque les services logistiques entrent en jeu, le nombre de chaînes de transformation résultantes augmentent. Ceci pourrait être dû au fait que les services logistiques peuvent intervenir entre chaque activité de transformation pour du transport ou du transport/stockage/transport. Toutefois, ces résultats méritent d'être affinés pour assister au mieux les décideurs. C'est l'objet de la phase suivante de réduction du nombre de solutions candidates.

### VI.4.3. Sélection des solutions candidates

Cette étape recherche des solutions opérationnelles en appliquant un certain nombre de filtres successifs. Parmi les exigences non fonctionnelles envisagées dans le Chapitre V, nous nous concentrerons sur les filtres les filtres spatial, temporel et liés à la production.

#### VI.4.3.1 Filtre spatial

À cette étape, les hypothèses de travail prennent en compte la distance géographique entre les services de transformation. Dans l'optique de la conservation d'un périmètre de transformation local, la distance référence, dans le cadre de ces travaux, est fixée à cinquante kilomètres comme précisée dans le chapitre IV. Les services des acteurs sont répartis géographiquement comme présentés dans la Figure VI-13.

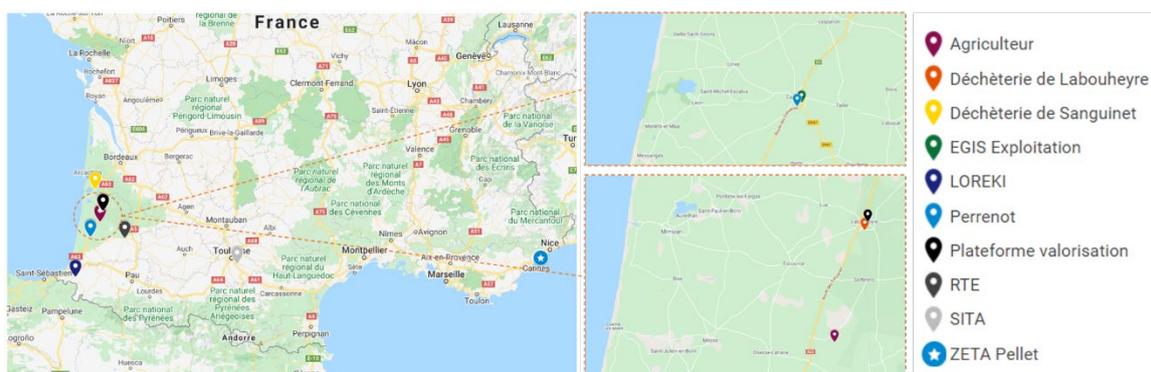


Figure VI-13 : Localisation géographique des acteurs du cas d'étude

Les résultats obtenus sont contenus dans le Tableau VI-11.

Distance entre service (km)	Compost		Granulés		Plaquettes	
	Procédés pertinents - Compost	Chaînes de transformation - Compost	Procédés pertinents - Granulés	Chaînes de transformation - Granulés	Procédés pertinents - Plaquettes	Chaînes de transformation - Plaquettes
50	945	3	10	0	10	3

Tableau VI-11 : Résultats des procédés déduits et des chaînes de transformation obtenues avec l'application du filtre géographique

Les résultats montrent qu'à une distance de cinquante kilomètres entre les services de transformation, le procédé de fabrication de granulés ne donne pas de solutions. En effet, le service de pelletisation, qui n'a pas de service concurrent, est très éloigné de la région Landaise. Par ailleurs, quelle que soit la distance entre les services de transformation, le nombre de procédés permettant de réaliser la transformation souhaitée reste bien le même. En effet, les activités de transformation du référentiel sont recherchées indépendamment de toute considération quant à l'existence de services les réalisant.

Il est alors intéressant d'observer l'impact de la (des) période(s) de disponibilité des services de transformation.

### VI.4.3.2 Filtre temporel

Les hypothèses de travail intègrent à présent les périodes de disponibilités des services de transformation. L'entreprise EGIS effectue le fauchage des déchets verts le long de l'autoroute puis le stockage intermédiaire des déchets verts sur site deux fois par an du 15/06/2020 au 15/07/2020 puis du 20/09/2020 au 10/10/2020. Les territoires du cas d'étude ont décidé de mettre fin au contrat de service de l'entreprise SITA au 01/05/2020. De plus, l'entreprise RTE effectue la coupe des taillis tous les ans entre le 15/04 et le 20/05. Les autres services sont considérés disponibles du 01/01/2020 au 31/12/2020. Un rétro planning prenant en compte le temps nécessaire pour chaque activité de transformation a été mis en place pour déduire les contraintes temporelles sur les activités en amont.

Les résultats sont présentés dans le Tableau VI-12.

Nombre possible de	Compost	Plaquettes
Procédés pertinents	945	10
Chaînes de transformation	3	3

Tableau VI-12 : Résultats obtenus à l'issue du filtre temporel concernant la disponibilité des services de transformation pour les procédés de compostage et de production des plaquettes

Le nombre de solutions possibles reste inchangé.

À présent, les disponibilités des flux de matière sont prises en compte. Les territoires souhaiteraient mener trois campagnes de distribution gratuite du compost aux habitants entre le 15/06/2020 et le 30/06/2020, entre le 10/07/2020 et le 25/08/2020 puis entre le 20/09/2020 et le 10/10/2020. Par ailleurs, la fabrication de plaquettes avant le début de la période de chauffe, c'est-à-dire entre le 01/09/2020 et le 01/10/2020, intéresserait les territoires pour les activités de vente aux entreprises.

Les résultats sont contenus dans le Tableau VI-13

Nombre possible de	Compost		Plaquettes	
Procédés pertinents	945		10	
Chaînes de transformation	3	Mise à disposition au plus tôt : 09/04/2020	3	Mise à disposition au plus tôt : 10/01/2020

Tableau VI-13 : Résultats obtenus à l'issue du filtre temporel concernant la disponibilité des flux pour les procédés de compostage et de production des plaquettes

Les résultats obtenus précédemment n'ont pas évolué avec l'ajout de périodes de disponibilités des bioproduits finaux. Cela peut s'expliquer par le fait que le procédé avec « appel » aux services d'acteurs s'effectue au plus tôt et non selon la période à laquelle le bioproduit est voulu.

Le compost sera disponible dès avril alors que les campagnes de distribution sont prévues en juin. Quant aux plaquettes, elles seront disponibles près de dix mois en amont de la vente prévue aux entreprises. Des dispositifs appropriés de stockage et de surveillance du compost et des plaquettes seraient donc à prévoir jusqu'aux dates de mise à disposition, pour éviter une dégradation des produits durant la période de stockage. Il en découle des conséquences économiques provoqués par des coûts de stockage supplémentaires. Par ailleurs, le stockage de la matière impacte la déduction d'autres chaînes de transformation en raison de l'indisponibilité du (des) service (s) de stockage. Il est aussi envisageable, selon la disponibilité des matières premières et des besoins sur le territoire, de relancer l'exécution du logiciel de déduction. Ces résultats découlent d'une hypothèse de production au plus tôt. Le principal avantage de cette gestion de la production est d'avoir un cycle de production le plus court possible (selon les disponibilités des services). Cette gestion convient particulièrement pour les

opérations de transformation de matière qui se dégrade rapidement ou lorsque la demande est urgente. En revanche, l'inconvénient principal de cette gestion au plus tôt est le besoin de stockage intermédiaire avant la date de livraison finale souhaitée. Pour éviter la création de stocks, une des solutions serait de prendre en compte la disponibilité maximale admissible de certains services pour se rapprocher de la date de livraison souhaitée sans la dépasser.

### VI.4.3.3 Filtre lié à la production

Il convient également de s'assurer que les moyens logistiques (de transport ou de stockage) sont compatibles avec les natures des flux entrants selon qu'ils soient liquides, solides ou gazeux.

Les résultats sont contenus dans le Tableau VI-14.

Nombre possible de	Compost		Plaquettes	
Procédés pertinents	945		10	
Chaînes de transformation	3	Mise à disposition au plus tôt : 09/04/2020	3	Mise à disposition au plus tôt : 10/01/2020

Tableau VI-14 : Résultats obtenus à l'issue du filtre de production concernant la nature des flux pour les procédés de compostage et de production des plaquettes

Ces deux procédés font appel à des flux de nature solide. L'ensemble des services logistiques proposés par les acteurs sont en capacité de prendre en charge des flux solides. Ceci explique pourquoi il n'y a pas de changements au niveau des solutions proposées.

### VI.4.3.4 Analyse des chaînes de transformation obtenues pour le cas d'étude

À présent, analysons les chaînes de transformation résultantes pour les deux solutions pertinentes de valorisation des déchets verts.

Trois chaînes de transformation réalisables sont proposées pour l'obtention de compost comme présenté dans la Figure VI-14.

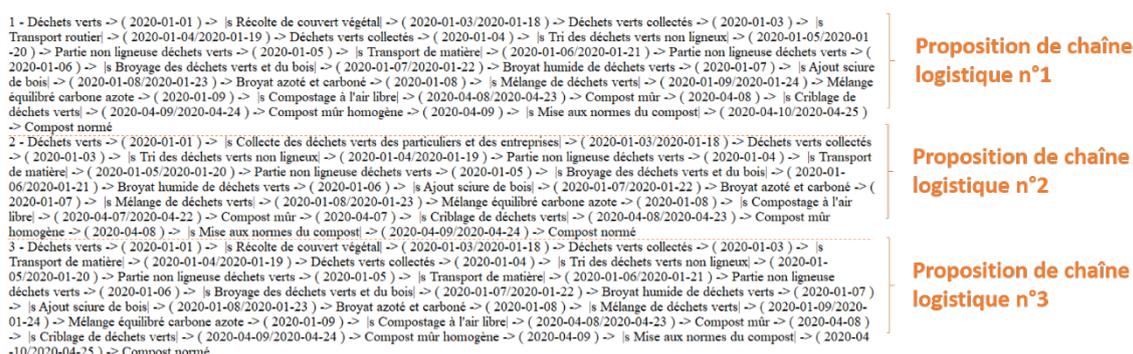


Figure VI-14 : Capture d'écran de chaînes logistiques proposées par le logiciel de déduction dans le cas de l'obtention du compost

Chacune met en œuvre une collaboration de services de transformation et logistiques différents. La solution 1 implique l'agriculteur À, l'entreprise PERRENOT, la déchèterie Sanguinet et la plateforme de valorisation. La mise à disposition du compost pour les solutions est fixée au 10/04/2020. La solution 2 implique la déchèterie Sanguinet et la plateforme pour une mise à disposition du compost au 09/04/2020. La solution 3 fait appel aux services de l'agriculteur A, de la déchèterie Sanguinet et de la plateforme de valorisation pour mise à disposition du compost au 10/04/2020.

Pour l'obtention de plaquettes de déchets verts, trois chaînes logistiques sont proposées par le logiciel comme présenté dans la Figure VI-15.

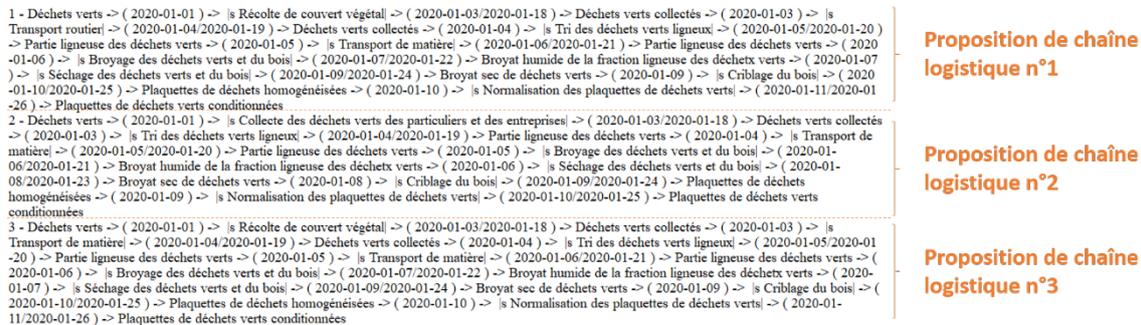


Figure VI-15 : Capture d'écran de chaînes logistiques proposées par le logiciel de déduction dans le cas de l'obtention des plaquettes

Comme pour la production de compost, chaque solution fait collaborer des services différents. La solution 1 implique l'agriculteur, l'entreprise PERRENOT, la déchèterie Sanguinet et la plateforme de valorisation pour une mise à disposition des plaquettes au 11/01/2020. La solution 2 implique la déchèterie Sanguinet et la plateforme pour une mise à disposition au 10/01/2020. La solution 3 fait appel aux services de l'agriculteur, de la déchèterie Sanguinet et de la plateforme de valorisation pour une mise à disposition des plaquettes au 11/01/2020.

Notons que dans les deux alternatives, on retrouve les mêmes acteurs. La collaboration d'acteurs permet d'identifier un réseau collaboratif d'acteurs polyvalents.

## VI.5. Introduction de variabilités : analyse de sensibilité

Il est intéressant d'observer comment réagit l'outil logiciel à des changements survenant dans l'environnement du procédé. Chaque instance du méta-modèle de la transformation de la biomasse est assimilable à une photographie prise à un instant t. Un changement détecté dans l'écosystème à t+1 fournit un nouveau modèle. L'algorithme déduit les procédés pertinents et les chaînes de transformation en fonction des données modélisées qui varient en fonction des changements détectés.

Ainsi, la reconfiguration du(des) procédé(s) pertinents et de la (des)chaîne(s) de transformation s'établit selon trois niveaux d'adaptation du changement en fonction de la profondeur du changement requis :

- La replanification du procédé (changement de disponibilité d'un service d'acteur de transformation ou logistique) : réorganisation des autres services d'acteur disponibles dans le temps.
- L'appel à une alternative de procédé sans changement de la demande (évolution de la composition de la matière première) : une réorganisation des services d'acteurs de transformation ou logistique disponibles selon leur capacité à traiter ce changement et leur disponibilité temporelle et géographique.
- Le changement complet de procédé (évolution de l'offre et de la demande) : une réorganisation complète nécessitant l'entrée en jeu d'un nouveau procédé, de nouveaux services d'acteurs de

transformation et logistique selon leur capacité à réaliser une (des) étapes de transformation, leur disponibilité temporelle et géographique.

Chaque niveau de reconfiguration sera appliqué au cas d'étude dans la section suivante avant d'être discuté.

### VI.5.1. Replanification du procédé : instabilité au niveau des services d'acteurs

#### VI.5.1.1 Changement de services d'acteurs

Les scénarios 1 et 2 suivants ont pour objectif de mesurer l'impact du changement de disponibilité d'un service de transformation sur le nombre de procédés pertinents.

##### Scénario 1

Nous posons l'hypothèse que le broyeur de la plateforme de valorisation connaît un dysfonctionnement technique le mettant hors d'usage entre le 01/01/2020 et le 01/03/2020. Ainsi le service de transformation de broyage proposé par cet acteur sera disponible à partir 02/03/2020 jusqu'à la fin de l'année. La distance de référence reste à cinquante kilomètres. Les résultats obtenus après ce changement sont contenus dans le Tableau VI-15.

Nombre possible de	Compost	Plaquettes
Procédés pertinents	945	10
Chaînes de transformation	0	0

*Tableau VI-15 : Impact du changement de la disponibilité du service de broyage proposé par la plateforme de valorisation sur les solutions données par le programme*

En l'absence du service de broyage, aucune solution n'est proposée. L'activité de broyage est commune pour ces deux procédés. Ceci peut s'expliquer par le fait que la durée de dégradation du flux de déchets fixée à quinze jours sera atteinte avant la réalisation du service de broyage, et ne sera réalisable que plus de quinze jours après la mise à disposition du flux entrant, la rendant impropre au traitement. Par ailleurs, le prototype logiciel est également en mesure de détecter des situations ne menant pas à des issues de transformations possibles.

##### Scénario 2

Nous posons l'hypothèse que l'agriculteur A procède à la récolte du couvert végétal entre le 15/04/2020 et 30/04/2020. La distance de référence reste à cinquante kilomètres. Les résultats obtenus après ce changement sont contenus dans le Tableau VI-16.

Nombre possible de	Compost	Plaquettes
Procédés pertinents	945	10
Chaînes de transformation	3	3

*Tableau VI-16 : Impact du changement de la disponibilité du service récolte proposé par la plateforme de valorisation sur les solutions données par le programme*

Dans les deux cas, le service de récolte du couvert végétal impacte les solutions faisant intervenir l'agriculteur A. La date de mise à disposition du compost et des plaquettes est alors fixée respectivement au 24/07/2020 et au 25/04/2020

### VI.5.1.2 Changement de disponibilité d'un service de transport

Le scénario ci-dessous vise à mesurer l'impact du changement de disponibilité d'un service de transport sur le nombre de procédés pertinents et de chaînes de transformation réalisables.

Nous posons l'hypothèse que l'entreprise PERRENOT interrompt ses activités de transport tous les ans le 1<sup>er</sup> Janvier et le 1<sup>er</sup> Mai. Cette hypothèse ne se cumule pas avec celle présentée en VI.4.4.1.2. Les résultats sont présentés dans le Tableau VI-17.

Nombre possible de	Compost		Plaquettes	
Procédés pertinents	945		10	
Chaînes de transformation	2	Mise à disposition au plus tôt : T0 +9 j	2	Mise à disposition au plus tôt : T0+10 j

Tableau VI-17 : Impact du changement de la disponibilité du service de transport proposé par l'entreprise PERRENOT

Les solutions restantes sont les solutions 2 et 3 par rapport à celles proposées en VI.4.3.4. Le transport de couvert végétal assuré par l'entreprise PERRENOT ne pouvant pas être assuré, la solution 1 n'est plus envisageable.

À l'issue de ces tests mettant en jeu des changements de disponibilité de services (transformation ou transport), l'algorithme est en capacité de réagencer la chaîne de transformation en faisant appel à des services équivalents et disponibles proposés par d'autres acteurs. Néanmoins, lorsqu'un même service de transformation est commun à différentes alternatives, son absence de disponibilité représente un aspect critique, car limitant pour la construction de chaînes. L'algorithme ne permet pas d'identifier en priorité ces services. Or, cela pourrait apporter des éléments de lecture supplémentaires à des résultats nuls et orienter la recherche d'acteurs proposant des services équivalents.

### VI.5.1.3 Ajout et retrait d'un service d'acteur

Les scénarios ci-dessous visent à mesurer l'impact de l'ajout ou du retrait d'un service d'acteur sur le nombre le nombre de procédés pertinents et de chaînes de transformation réalisables.

#### Scénario 1 : Ajout d'un service d'acteur

Nous posons l'hypothèse que la déchèterie SIVOM de Sanguinet s'équipe d'un broyeur fixe pour le compostage à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2020. Les résultats sont présentés dans le Tableau VI-18. Ce service est en capacité de réaliser l'activité « Broyage des déchets verts pour compostage » contenue dans le référentiel de procédés.

Nombre possible de	Compost		Plaquettes	
Procédés pertinents	1215		10	
Chaînes de transformation	6	Mise à disposition au plus tôt : T0+9 j	3	Mise à disposition au plus tôt : T0+10 j

Tableau VI-18 : Impact de l'ajout d'un nouveau service de transformation proposé par la déchèterie SIVOM de Sanguinet

Les résultats montrent que le nombre de procédés pertinents et de chaînes de transformation associées à la production de compost ont augmenté par rapport à celles présentées en VI.4.3.3. Ce

nouveau service proposé à modifier la combinatoire des procédés (et des chaînes de transformation) admissibles. On le retrouve dans ces nouvelles solutions proposées.

### Scénario 2 : Retrait d'un service d'acteur

Nous émettons l'hypothèse que la déchèterie de Sanguinet est contrainte de fermer ses portes pour des travaux de remise en état de l'ensemble du site. Les travaux sont prévus sur une année entre le 01/01/2020 et le 31/12/2020. Les résultats sont présentés dans le Tableau VI-19.

Nombre possible de	Compost	Plaquettes
Procédés pertinents	432	4
Chaînes de transformation	0	0

Tableau VI-19 : Impacts du retrait des services proposés par la déchèterie Sanguinet

Les résultats montrent bien une diminution du nombre de procédés pertinents. L'absence des services de transformation de « collecte des déchets verts aux particuliers et aux entreprises », de « tri des déchets ligneux » et de « tri des déchets verts non ligneux » ne permet pas la construction de chaînes de transformation.

Ainsi, l'ajout et/ou le retrait d'un service de transformation impacte plus ou moins la construction de la chaîne de transformation selon son aspect critique et sa décomposition possible en sous-services.

#### VI.5.2. Instabilité de l'approvisionnement : Appel à une alternative du procédé

Seul le procédé de plaquettes sera pris en compte dans ce scénario. La qualité de la biomasse a évolué. En effet, elle est plus sèche et ne contient que des branchages. Cela nécessite de s'appuyer sur un procédé de fabrication de plaquettes plus adapté. De plus, un nouvel acteur qui possède des services de transformation pouvant réaliser des étapes de transformation est identifié sur le territoire.

Nombre possible de	Plaquettes	
Procédés pertinents	2	
Chaînes de transformation	1	Mise à disposition au plus tôt : T0+5 j

Tableau VI-20 : Impact de l'ajout l'instabilité de l'approvisionnement en termes de qualité

L'ajout de ces nouvelles informations fait émerger une chaîne de transformation réalisable (Tableau VI-20).

L'algorithme est en capacité de faire appel à une autre alternative de transformation mettant en jeu un même type matière mais avec une caractéristique intrinsèque différente. Ce qui implique que les données relatives aux flux de chaque alternative soient le plus renseigné possible. En effet, ces données permettent notamment de caractériser une certaine qualité de produit attendu en termes de pureté. Toutefois, il reste difficile d'avoir accès des données complète pour chaque flux dans la littérature.

#### VI.5.3. Instabilité de l'offre et de la demande : Appel à nouveau procédé

Seul le procédé de plaquettes sera pris en compte dans ce scénario. Dans ce cas de figure, l'offre et la demande évoluent. La matière première disponible n'est plus les déchets verts mais les biodéchets. L'objectif est l'obtention de fertilisant solide brut qui est demandé pour l'amendement des sols des agriculteurs, qui sont appauvris en matière organique sur ces territoires.

Nombre possible de		Plaquettes
Procédés pertinents	1	
Chaînes de transformation	1	Mise à disposition au plus tôt : T0+47 j

Tableau VI-21 : Impact de l'ajout l'instabilité de l'approvisionnement en termes d'offre et de demande

Ces changements sont pris en compte par l'algorithme qui trouve une chaîne de transformation réalisable (Tableau VI-21).

Un avantage de l'algorithme repose sur sa capacité à proposer pour une matière et un produit donnés différent type de procédés possibles. Selon les disponibilités des services de transformation et logistique, cette capacité de l'algorithme ouvre la possibilité de faire appel à des acteurs différents et l'utilisation d'équipements existants différents.

#### VI.5.4. Cas du changement de la distance de référence

Le Tableau VI-22 évalue l'impact de la distance de référence choisie selon les procédés jugés pertinents. Les résultats obtenus dépendent non seulement des services de transformation disponibles pour réaliser une activité du référentiel mais également des services logistiques. Les entreprises LOREKI, SITA et ZETA PELLETS, situées respectivement à plus de quatre-vingt-dix, deux cents et six cents kilomètres des territoires considérés, sont progressivement incluses dans la liste des acteurs potentiels. Par conséquent, pour ce cas d'étude, plus la distance est importante plus le nombre de chaînes de transformation déduites est important jusqu'à l'atteinte d'un palier qui peut être expliqué par l'épuisement du nombre d'alternatives logistiques possibles. Par ailleurs, pour le cas d'étude, le nombre de solutions n'évolue pas dans une limite de quatre-vingts kilomètres entre les services. Cela pose néanmoins la question de l'impact du transport en termes temporel, environnemental et économique.

Distance entre service (km)	Compost		Granulés		Plaquettes	
	Procédés pertinents - Compost	Chaînes de transformation de la matière-Compost	Procédés pertinents - Granulés	Chaînes de transformation de la matière - Granulé	Procédés pertinents - Plaquettes	Chaînes de transformation de la matière Plaquettes
20	945	0	10	0	10	0
40	945	1	10	0	10	1
50	945	3	10	0	10	3
60	945	3	10	0	10	3
80	945	3	10	0	10	3
100	945	4	10	0	10	4
300	945	22023	10	0	10	51
500	945	22023	10	0	10	51
1000	945	22023	10	51	10	51

Tableau VI-22 : Évolution du nombre de procédés pertinents et de chaînes de transformation associés

De plus il convient de noter qu'à plus ou moins dix kilomètres autour de la distance de référence choisie pour le cas d'étude, le nombre de chaînes logistiques possibles passe du simple au triple pour les procédés de compostage et de fabrication de plaquettes. Ce résultat peut s'expliquer par la présence de plus de quatre-vingts pour cent des services dans un périmètre de quarante-cinq kilomètres autour de la commune de Sabres, au cœur de la Communauté de Communes Cœur Haute Landes.

## VI.6. Discussion des résultats obtenus

L'outil logiciel permet d'obtenir des propositions de chaînes de transformation cohérentes avec les données du cas d'étude. Elles mettent en évidence la collaboration de services de transformation et logistique d'acteurs au sein des territoires. Cependant, la planification au plus tôt limite le nombre de solutions possibles selon les dates de disponibilités des flux et des services ainsi que la durée au bout de laquelle le flux n'est plus utilisable. C'est pourquoi il pourrait être intéressant dans les futurs développements de l'algorithme et du logiciel de permettre un jalonnement au plus tôt et au plus tard. Cette planification au plus tard demande des changements importants dans l'algorithme de déduction au niveau des services (transport et stockage) mais également des flux. Par ailleurs, l'impact de la logistique, que ce soit d'un point de vue temporel, économique ou environnemental nécessite d'être évalué. En effet, les services logistiques nécessaires à la réalisation de la chaîne de transformation sont indispensables dans notre approche de décentralisation du procédé. Mais ces derniers ont un coût qui doit pouvoir être supporté par les acteurs engagés dans la démarche.

Une attention toute particulière est portée sur le procédé de compostage et le procédé de méthanisation. Le procédé de compostage aboutit à la fabrication de compost, mais pas seulement. En effet, suite à l'étape de criblage, avant la normalisation, des refus (éléments grossiers indésirables) sont générés. Ces derniers peuvent réintégrer le procédé de compostage, c'est-à-dire être recyclés soit dans le même procédé soit être introduits dans un autre procédé comme apport structurant. C'est le cas dans le procédé de compostage des boues d'épuration, par exemple. Il en est de même pour le procédé de méthanisation qui génère du biogaz mais aussi du digestat.

Une évolution intéressante serait d'étendre le périmètre du procédé pour y intégrer les activités de recyclage. Cette approche s'inscrit dans une optique de viabilité économique marquée par la création d'une gamme de bioproduits (pouvant répondre à différents marchés) et à la production de bioproduits à forte valeur ajoutée (en isolant les substances pures) (Amidon et al., 2011). Dans ce sens, l'optimisation de bioraffineries lignocellulosiques multiproduits fait l'objet de plusieurs études ciblant un critère de variabilité tel que la saisonnalité (Giuliano et al., 2016) ou encore la localisation du gisement (Schröder et al., 2019). De plus, selon (Katakajwala et Mohan, 2021) afin d'optimiser la production tout en réduisant les déchets et faciliter leur recyclage, la mise en place de boucles fermées est préconisée.

Il est intéressant de se pencher sur les procédés considérés comme irréalisables selon le nombre de services manquants. En effet, les voies d'action ne sont pas les mêmes suivant la proportion d'activités n'ayant pas de services correspondants disponibles. Une piste d'évolution serait de pouvoir informer l'utilisateur de l'intérêt qu'un procédé peut susciter au regard de son pourcentage de réalisation potentielle sur le territoire (par exemple au-delà de 80%). Ce changement implique des modifications substantielles de l'algorithme présenté dans le cadre de ces travaux de thèse. Ce positionnement peut également être à l'origine d'une évolution de services existants par l'achat et/ou le prêt de ressources ou encore la création d'un nouveau service. Ceci participe davantage à l'économie de fonctionnalité. À ce sujet, il existe des solutions intéressantes de prêt de matériels entre les acteurs d'un territoire, qui sont encadrées juridiquement. En ce qui concerne les agriculteurs, les Coopératives d'Utilisation de Matériel Agricole (CUMA) permettent aux agriculteurs de mettre au commun leurs ressources pour l'utilisation de matériels agricoles. Au sein du territoire du cas d'étude, la CUMA de Borne peut s'avérer être un acteur intéressant de ce point de vue-là.

Par ailleurs, La performance de cette collaboration et du service de l'acteur, de manière individuelle, peut être évaluée d'un point de vue fonctionnel (a-t-il réalisé ce qu'il a déclaré être capable de faire ?) et d'un point de vue de sa prestation de service (respect des délais, etc.). Un aspect fort de l'apport d'agilité au sein de la chaîne de transformation de la matière repose sur la confiance entre les

---

membres du réseau collaboratif créé. Il s'agit d'un aspect important de la servicisation directement associé à l'offre de service. Dans le cadre de collaboration inter-organisationnelle, la confiance d'un acteur est définie par (Hardy et al., 2003) comme :

*« Une relation de coopération inter-organisationnelle qui est négociée dans le cadre d'un processus de communication continu et qui ne repose ni sur un marché ni sur des mécanismes de contrôle hiérarchique »*

Selon (Zaheer et al., 1998), la confiance inter-organisationnelle joue un rôle dans l'amélioration des performances des acteurs de la collaboration et dans la survenue de conflits. Elle peut être exploitée en capitalisant la connaissance relative aux collaborations des services d'acteurs qui ont permis d'aboutir aux bioproduits souhaités. En effet, ces dernières pourraient constituer un filtre non fonctionnel : « services d'acteurs qui fonctionnent bien ensemble ».

## VI.7. Conclusion

Le prototype logiciel développé dans le cadre de ces travaux de thèse a pour objectif d'implémenter l'ensemble du mécanisme de déduction. Il a été utilisé pour un cas d'étude concernant la valorisation de la biomasse dans le périmètre de deux territoires du département des Landes.

Les données ont été collectées au travers d'entretiens avec des acteurs du territoire et au moyen de documents pertinents par les collectivités territoriales. Leur utilisation a permis dans un premier temps de représenter l'environnement de la situation collaborative à l'aide de modèles. Les modèles (contexte, partenaire, objectif, performance) obtenus à partir de l'instanciation du méta-modèle de la situation collaborative pour la transformation de la biomasse dressent une description couvrante et détaillée de l'écosystème. Plusieurs acteurs du territoire sont pertinents pour le processus de collaboration. Ces modèles précisant les enjeux et contraintes du territoire sont complétés par des modèles de procédés (issus de l'instanciation du méta-modèle de procédés). Les modèles de procédés de compostage, de méthanisation, de fabrication de GNC, plaquettes et granulés constituent le référentiel de procédés. Leur modélisation selon différents niveaux de granularité facilite la décomposition du procédé et la correspondance des activités de transformation avec les services de transformation proposés par les acteurs. La connaissance obtenue de ces deux méta-modèles est suffisante pour initier la déduction du processus collaboratif.

Le logiciel s'appuie sur les données citées précédemment. La déduction de la (des) chaînes de transformation s'est faite conformément au cadre méthodologique développé : collecte et organisation des données, déduction du(des) procédé(s) pertinent(s) puis application de filtres spatio-temporels et de production pour faire émerger la(les) chaîne(s) de transformation(s) réalisables(s). Il en découle plusieurs propositions de chaînes de transformation cohérentes, pertinentes et répondant à l'objectif souhaité par les territoires. Ces résultats peuvent aider à la prise de décision sur les territoires considérés. Ces résultats sont mis à leur disposition. De plus, l'outil logiciel réagit de manière cohérente aux différents changements pouvant être source d'instabilité. Néanmoins, il est nécessaire d'intégrer dans les futurs développements de l'outil une planification au plus tard afin de pouvoir se rapprocher au plus près des attentes des décideurs de terrain. De plus, une analyse économique permettrait de mesurer l'impact d'une telle décentralisation de la transformation de la matière à l'échelle locale

Le prototype logiciel est appelé à évoluer dans les mois qui viennent, via les travaux de la post-doctorante recrutée sur le projet ARBRE. Le code relatif à l'algorithme de déduction sera notamment intégré sous forme d'API REST. L'accès aux données quant à lui se fera via une base de données relationnelle (type PostgreSQL), pour faciliter l'accès et la maintenance des données. La saisie des données relatives aux différents modèles sera rendue plus ergonomique par le développement d'un modèleur dédié. Enfin, le(s) chaîne(s) de transformation réalisable(s) déduite(s) sera (seront) présentée(s) aux décisionnaires sous un format standard et permettant par la suite une orchestration du processus (BPMN 2.0 par exemple).

## Conclusion générale

---

Ce chapitre de conclusion marque l'épilogue de ces travaux de thèse.

Dans un premier temps, un regard général de l'apport d'agilité pour la chaîne de transformation de la matière sera dressé en revenant sur le contexte, les motivations et les objectifs généraux de ces travaux de thèse. Puis, dans un second temps, les principales contributions seront détaillées en fonction des questions de recherche posées suite à l'état de l'art. Enfin, des perspectives et différentes pistes d'amélioration et d'ouverture seront présentées.

## 1. Contexte, motivations et objectifs généraux

Le Génie des Procédés est un domaine d'ingénierie incontournable pour le support d'une transition écologique, sociétale et économique vers une production industrielle plus durable. Cet enjeu s'inscrit dans un environnement instable, empreint d'une forte concurrence entre les entreprises. Dans ce contexte, répondre à une offre et une demande toujours plus changeante constitue un défi majeur. C'est pourquoi l'industrie de procédés se doit d'être réactive, reconfigurable et flexible aux changements survenant dans son environnement mais également au sein de son système de production. Pour y arriver, il faut également compter sur la progression des services dans l'industrie et l'accroissement du niveau de digitalisation. En effet, ces mutations offrent de nouvelles voies d'organisation et de structuration des moyens de production tournées vers l'Usine du Futur.

L'apport d'agilité dans l'industrie de procédés se pose. Et pour cause, la transformation de la matière est impactée par plusieurs facteurs au niveau structurel et au niveau organisationnel. Ces facteurs génèrent des variabilités à différentes étapes de la chaîne de transformation de la matière (approvisionnement, production etc.). Le concept d'agilité répandu dans l'industrie manufacturière s'avère être une approche intéressante pour les industries de procédés. En effet, il allie maintien de la compétitivité et évolution dans un environnement incertain. Cependant, la mise en œuvre de l'agilité dans le Génie des Procédés se révèle balbutiante, tant au niveau de sa conceptualisation que de ses outils. Ces travaux s'inscrivent dans le sillage des réflexions de l'agilité dans le Génie des Procédés menés par des auteurs comme (Bogle, 2017; Qian et al., 2017). La production qui est visée s'oriente vers des modèles d'affaires disruptifs reposant sur les technologies et les concepts de l'Industrie 4.0.

Cette thèse s'est efforcée de proposer un cadre conceptuel mais également un cadre méthodologique outillé pour apporter de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière en tenant compte des variabilités de son écosystème à l'échelle territoriale.

Notre vision de l'agilité s'appuie sur quatre dimensions : détection, adaptation, réactivité et efficacité. Ces travaux de thèse encouragent une vision systémique de la transformation de la matière positionnant le procédé dans son écosystème. Ainsi, notre approche vise à fournir de l'agilité à l'ensemble de la chaîne de transformation de la matière en décentralisant le procédé sur des unités de transformation existantes.

Chaque axe thématique nous a permis de renforcer les principes fondamentaux de notre vision de l'agilité. Le premier axe concerne la notion d'Usine du Futur (telle que définie par la SFGP). Elle s'exprime au travers d'une adaptation et d'une modularité des procédés aux besoins changeants au sein d'usines virtuelles intégrées dans les territoires. Cette notion confirme la pertinence de l'agilité en vue de tendre vers ce type d'usine. Le second axe concerne la chaîne de transformation de la matière. L'agilité interroge les modes de production et les flux de matière sur les variétés des voies technologiques au regard des dépenses d'investissement et d'exploitation. Enfin, le troisième axe touche les infrastructures et les réseaux d'acteurs. Majoritairement centralisées et peu ancrées dans les territoires, les infrastructures de production demeurent rigides et dimensionnées pour une matière première et un bioproduit fixé. Quant au réseau d'acteurs, il est le plus souvent extérieur au territoire dans lequel est implantée l'usine.

Pour contrer ces difficultés, notre vision de l'agilité propose une nouvelle vision qui décentralise la chaîne de transformation de la matière vers des sites de plus petite taille. De plus, notre approche instaure un réseau collaboratif entre acteurs locaux. Notre vision de l'agilité s'inscrit à l'intersection de plusieurs disciplines (Génie des Procédés, Génie Industriel, Systèmes d'Information) et thématiques (Usine du futur, Chaîne de transformation de la matière, Entreprise virtuelle, Réseaux collaboratif) qui sont représentatives de la complexité du champ la transformation de la matière.

Ainsi, dans ces travaux de thèse, les contributions ont tenté d'apporter des briques conceptuelles, méthodologiques et technologiques à la problématique scientifique.

## 2. Contributions majeures

Afin de répondre à la problématique scientifique, les travaux menés dans cette thèse ont contribué à :

- Conceptualiser l'agilité pour l'industrie de procédés,
- Déterminer une approche méthodologique pour développer l'agilité,
- Implémenter l'agilité.

Ces travaux s'appliquent à la transformation de la biomasse qui représente un cas d'application particulièrement intéressant pour l'apport d'agilité car cette matière et les bioproduits qui en découlent sont soumis à diverses variabilités.

Les chapitres I et II ont dressé les enjeux ainsi que les contextes industriel et scientifique de l'agilité dans l'industrie de procédés.

### 2.1. Conceptualisation de l'agilité pour l'industrie de procédés

La conceptualisation est présentée dans le chapitre III. Pour réorganiser le procédé au-delà de la structure monolithique, nous adoptons une vision système où le procédé est décentralisé sur les installations existantes du territoire. Chacune des opérations unitaires peut être réalisée sur différents sites et non plus un seul. Cela permet de détecter les variabilités du procédé et de son environnement au moment de sa construction mais aussi lors de son exploitation.

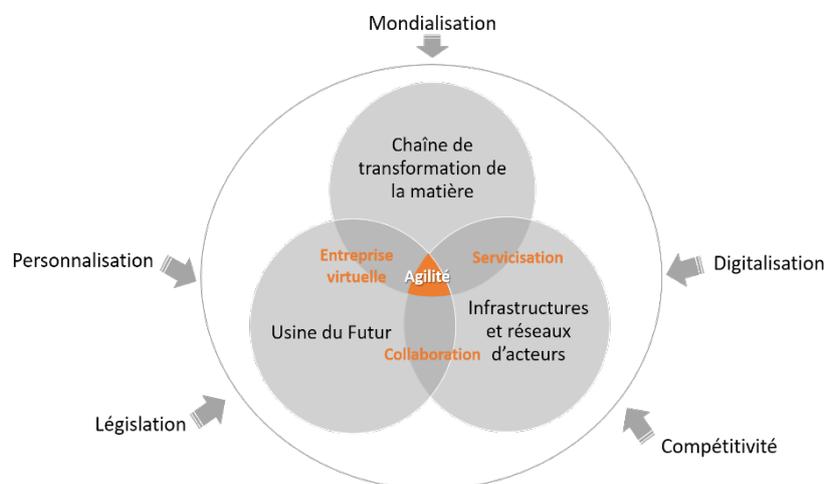


Figure 16 : Concepts supportant l'agilité pour l'industrie de procédés

Cette décentralisation donne l'opportunité d'associer les acteurs du territoire à la réalisation du procédé. L'objectif poursuivi est de pouvoir s'appuyer sur leurs ressources qu'elles soient matérielles, humaines, connaissance métier. Ce n'est donc plus la capacité d'un équipement à réaliser une opération unitaire qui est recherchée mais bien une offre de services complète que pourrait proposer un acteur du territoire. Cette transition vers la vente d'une offre de services plutôt qu'un produit s'appelle la servicisation. Initialement, la servicisation est une offre intégrée associant un produit et une offre de service, de l'assistance et de la connaissance. Dans notre cas, la servicisation associera une opération unitaire, une offre de services, l'assistance et de la connaissance. Ainsi, un acteur du territoire pourra proposer une offre service de transformation qui réalisera une ou plusieurs opérations unitaires.

C'est la collaboration des services d'acteurs qui permet l'exécution du procédé en réutilisant l'existant et sans avoir recours à la construction d'une nouvelle usine. Elle est rendue possible grâce aux services logistiques qui feront le liant entre les différents services de transformation d'acteurs quand cela sera nécessaire. Les acteurs participant à la collaboration s'adapteront aux objectifs et aux contraintes de la situation.

## 2.2. Détermination d'une approche méthodologique pour développer l'agilité

Afin de fournir de l'agilité à la chaîne de transformation de la matière, nous avons conçu un cadre méthodologique. La première étape, présentée dans le chapitre IV, consiste à décrire l'écosystème du procédé, en vue de sa déduction. Cette description de l'écosystème passe par la modélisation et la structuration de la connaissance, qui supporte et articule la construction de la collaboration.

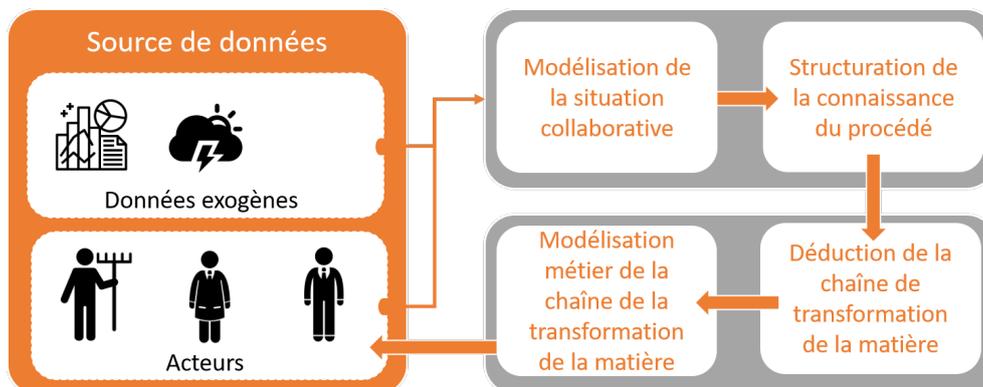


Figure 17 : Cadre méthodologique pour la mise en œuvre de l'agilité

La connaissance requise concerne l'environnement et le procédé en tant que tel (d'un point de vue physico-chimique, des conditions opératoires). À ce niveau, nous avons mis en évidence qu'une vision fonctionnelle faciliterait la servicisation du procédé. La connaissance nécessaire comprend également les exigences relatives à la bonne exécution du procédé, à savoir les données concernant les différentes étapes de transformation ainsi que les caractéristiques physico-chimiques des flux entrants et sortants.

Dans cette perspective, en adoptant une vision fonctionnelle pour faciliter la servicisation du procédé, nous avons développé deux méta-modèles complémentaires : un méta-modèle de la situation collaborative et un méta-modèle du procédé. Ils permettent respectivement de soutenir la collecte des données et de structurer les connaissances de la situation collaborative en fonction de l'environnement, des partenaires, des objectifs et des performances et d'organiser les connaissances sur les processus de transformation de la matière (biomasse). L'instanciation de ces deux méta-modèles fournit les connaissances nécessaires pour établir un réseau collaboratif de transformation de la biomasse. Cette approche nous permet de proposer un méta-modèle générique pouvant s'appliquer à tout type de transformation de matière première.

Le cadre méthodologique comporte une seconde étape d'exploitation de la connaissance présentée dans le chapitre V. Pour déduire la(les) chaîne(s) de transformation de la biomasse, nous avons développé un algorithme qui soutient la conception du réseau collaboratif.

Le processus de déduction se compose de trois grandes étapes : l'organisation des bases de données relatives aux activités de transformation, aux services et aux acteurs. Elles sont structurées pour mettre en évidence les services disponibles, la superstructure de procédés et les procédés pertinents puis la(les)chaîne(s) de transformation de la matière réalisable(s) grâce à une application

---

séquentielle de filtres. Par ailleurs, pour favoriser la compréhension des parties prenantes, nos réflexions s'orientent vers une représentation standardisée de la (les) chaîne(s) de transformation (s) réalisables(s), en s'appuyant sur le langage BPMN 2.0.

Le prototype logiciel développé a pour objectif d'implémenter l'algorithme de déduction. Il a été appliqué à un cas d'étude, basé sur des données réelles, concernant la transformation de la biomasse dans deux territoires du département des Landes. Après avoir déterminé les modèles de contexte, de partenaires, d'objectifs et de performance provenant de l'instanciation du méta-modèle de la situation collaborative pour le traitement de la biomasse, nous avons modélisé les procédés issus de la littérature sous forme de référentiel de procédés conformément à la modélisation IDEF 0. La connaissance collectée, organisée en modèles, nous permet alors d'alimenter le mécanisme de déduction de la chaîne de transformation de la matière.

### 2.3. Implémentation de l'agilité

L'outil logiciel présente des résultats pertinents qui peuvent être mis à disposition des décideurs pour les aider dans leur choix. Une analyse de sensibilité a permis d'éprouver sa robustesse. Cependant, le choix d'une planification de la chaîne de transformation au plus tôt est un aspect à faire évoluer dans les développements ultérieurs afin de limiter une mise à disposition trop anticipée du produit final.

Les résultats présentés dans le chapitre VI montrent l'intérêt de notre cadre méthodologique et de l'algorithme de déduction. Pour autant, il est indispensable de vérifier l'usage et l'utilité de la preuve de concept ainsi que de l'ensemble du cadre d'aide à la décision sur le terrain lors d'expérimentations in situ.

Les contributions ont permis de mettre en évidence deux aspects vis-à-vis de l'apport d'agilité dans l'industrie de procédés. En effet l'agilité permet de déduire la chaîne de transformation appropriée en fonction des variabilités de l'écosystème et des services de transformation mais également logistiques proposés par les acteurs. De plus, l'agilité décentralise le procédé sur des sites de taille diverses, selon les installations existantes, mais qui sont ancrés sur les territoires, ce qui peut favoriser un certain dynamisme économique et une meilleure acceptabilité sociale. Ainsi, les deux suppositions émises dans le chapitre I sont validées.

Les travaux présentés dans cette thèse initient une démarche originale d'aide à la conception innovante de l'ensemble de la chaîne de transformation de la matière, y compris le procédé. Ils ouvrent des perspectives de recherche scientifiques, applicatives et techniques.

## 3. Améliorations et perspectives

### 3.1. D'un point de vue socio-économique

#### 3.1.1. Nécessité d'un modèle économique

L'étude des aspects économiques et financiers ne fait pas partie du périmètre de cette thèse. Pour autant, il n'est pas possible de s'en affranchir pour la suite de ces travaux. La question des coûts de mise en œuvre et d'exploitation apparaît comme des éléments importants pour la viabilité de notre approche.

L'apport d'agilité poursuivi dans notre cadre méthodologique est en opposition avec la tendance de centralisation des systèmes de production à l'instar des bioraffineries intégrées ou encore de la production centralisée d'énergie (centrale nucléaire, centrale thermique par exemple).

Cependant, il serait inopportun de comparer les systèmes, puisqu'ils ne poursuivent pas les mêmes objectifs de production. En effet, l'agilité des procédés vise à valoriser une ressource ayant un intérêt identifié pour le territoire, à éviter le gaspillage de la ressource par une non-valorisation ou encore à stimuler l'économie locale, dans une démarche de servicisation. Sur ce point, la détermination d'un modèle économique est un point crucial pour la mise en œuvre de tels procédés et leur intégration au sein d'une stratégie territoriale. Ce modèle économique soutenant la vision Système Produit-Service de notre approche aura pour but de définir précisément l'optique les bénéfiques pour chaque acteur ainsi que pour l'ensemble de la collaboration. Il permettrait d'une part de positionner la logique globale du concept par rapport aux modèles économiques de production existants en Génie des Procédés et d'autre part d'explicitier la chaîne de création de valeur.

### 3.1.2. Intérêts d'une conduite du changement

Notre approche revêt un certain caractère innovant. Pour les territoires intéressés par notre approche, il semble judicieux de mener un projet de conduite du changement. Aujourd'hui, parmi les différents modèles existants de conduite du changement (Galli, 2018), les travaux de (Hayes, 2018) fournissent des outils pour diffuser et communiquer sur le changement auprès d'organisations. Cela permettrait d'une part de garantir une compréhension claire du concept et d'autre part de favoriser une adhésion et une participation des parties prenantes relevant de la transformation de la matière. Du fait de la bonne connaissance des territoires et de la diversité des publics touchés, ce projet de conduite du changement peut être porté et déployé par les institutions locales. Il aurait pour objectif d'accompagner et de guider les acteurs du territoire dans les changements organisationnels mais aussi structurels.

## 3.2. D'un point de vue métier

### 3.2.1. Impact de la logistique sur l'intégration énergétique

L'agilité, de par notre conceptualisation, n'est pas adaptée aux industries mettant en œuvre des procédés continus. Ces derniers requièrent une circulation des flux constants pour une production ininterrompue. En revanche, il s'adresse davantage à des procédés de type batch (discontinus ou semi-continus) pour lesquels les propriétés des flux peuvent évoluer dans le temps. Ce positionnement couplé à la décentralisation du procédé entraîne des activités logistiques de transport et/ou de stockage nécessaires pour l'acheminement d'un flux d'un service à un autre sur le territoire étudié. Selon le contexte, l'objectif de transformation ou encore les services et leur disponibilité, les activités logistiques peuvent être nombreuses : transport, stockage intermédiaire ou sur un plus long terme. Les activités logistiques sont associées à des coûts directs et indirects (entretien du véhicule, carburant, opérateur (conducteur, manutentionnaire), charges liées à l'immobilisation de la matière). Ceci souligne le fait que, même sur de courtes distances, la logistique est une question centrale dans la viabilité de notre approche d'un point de vue économique. Une analyse des activités logistiques pourrait s'avérer intéressante pour envisager son optimisation.

Par ailleurs, l'utilisation rationnelle de l'énergie est un enjeu auquel sont confrontées les industries de procédés lors des phases de conception et de développement d'un système. Ce facteur influence la productivité de l'entreprise et ses impacts sur l'environnement. La logistique déployée dans le cadre de la fourniture d'agilité à la chaîne de transformation de la matière questionne sur l'intégration énergétique c'est-à-dire la prise en compte globale de l'énergie dans un procédé pour en rationaliser son utilisation et améliorer l'efficacité énergétique (réduction des consommations d'énergie, baisse des consommations d'eau, récupération d'énergie). En effet, lors du déplacement ou du stockage intermédiaire d'un flux nécessitant un maintien à une température ou une pression particulière, de

---

l'énergie est requise. Elle s'ajoute à celle déjà mise en œuvre pour réaliser l'activité de transformation, allant à l'encontre de l'intégration énergétique. Ce qui nous mène vers une autre question non abordée dans ces travaux de thèse concernant le coût énergétique ainsi que les possibilités de recyclage de flux secondaires du procédé.

### 3.2.2. Prise en compte du recyclage des flux au sein du procédé

Dans le cadre de ces travaux, le périmètre de la chaîne résultant de la déduction du procédé intègre tous les flux (entrants, sortants et intermédiaires) ainsi que les services d'acteurs. En revanche, les émissions et les rejets de produits intermédiaires ne sont pas pris en compte. Ces derniers peuvent faire l'objet d'une réutilisation et/ou d'un recyclage (sur le même procédé ou sur un autre) alors même que cette étape fait partie intégrante de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) d'un produit (Poux et al., 2015). C'est notamment le cas du procédé de compostage ou de méthanisation qui respectivement produisent des refus de crible et des rejets de purification du digestat qui peuvent réintégrer le procédé. Néanmoins, selon les procédés, les activités de recyclage manquent de solutions économiquement viables selon les caractéristiques de la matière à traiter.

### 3.2.3. Parallélisation des services d'acteurs

Une première hypothèse a été d'établir la réalisation d'une activité par un seul service, et cela quel que soit le niveau de granularité de l'activité du procédé. Cette hypothèse peut évoluer en supposant que plusieurs services peuvent réaliser parallèlement une seule et même activité. Cette combinaison (parallélisation de services) est envisageable, par exemple, en cas d'une capacité de traitement insuffisante pour une collaboration de services disponibles ayant les mêmes exigences fonctionnelles. Il en découle potentiellement une multiplication des services logistiques nécessaires entre les services d'acteurs effectuant le traitement parallélisé et augmentation du nombre de procédés pertinents possibles. Cette évolution nécessitera de changer la stratégie de déduction présentée dans ces travaux.

### 3.2.4. Favoriser l'interopérabilité entre les acteurs et au sein du procédé

Une piste de réflexion particulièrement intéressante pour favoriser l'interopérabilité entre les acteurs de la chaîne de transformation de la matière relève de l'Internet Physique. Ce concept s'inspire des fondamentaux d'Internet appliqués aux réseaux logistiques. Il utilise des protocoles de collaboration horizontaux (entre les entreprises qui peuvent fournir des services complémentaires ou concurrents) et verticaux (entre les membres d'une même chaîne de valeur) ainsi que la standardisation de modules (conteneurs, caisses) et d'interfaces intelligentes qui garantissent l'interconnexion entre les conteneurs, leur dispositif de circulation, les plateformes logistiques (Ballot et Montreuil, 2014). Selon (Treiblmaier et al., 2020) l'Internet Physique présenterait des avantages d'un point de vue économique. Il contribuerait à diminuer les coûts logistiques, notamment ceux liés aux stocks et au transport, grâce à des circuits logistiques impliquant différents modes de transport capables de prendre en charge le module avec flexibilité (« plug and play »).

En Génie des Procédés, dans le domaine de la chimie fine (pour des volumes faibles et une production personnalisée) des expérimentations de procédés modularisés et standardisés ont été menées (Reitze et al., 2018). Leur mise sur le marché est conditionnée au développement d'équipements adaptés pour une reconfiguration automatisée des modules. Les recherches sur cette approche ne sont qu'à leurs débuts (Pan et al., 2017) mais elles laissent entrevoir des développements dans différents domaines ayant trait à la digitalisation de l'industrie, l'économie circulaire ou encore l'économie du partage. Ainsi, la standardisation des opérations unitaires du procédé facilite l'interopérabilité grâce à la modularisation. La capacité de production peut être réglée de manière

flexible en faisant varier le nombre et le type de modules, favorisant la mise en œuvre d'une usine virtuelle.

### 3.3. D'un point de vue de l'implémentation technique de l'outil

Le prototype logiciel présenté dans le chapitre V concerne uniquement la déduction de la chaîne de la transformation de la matière en fonction d'une situation collaborative donnée. Il constitue l'outil principal de l'étape du traitement de la connaissance du cadre méthodologique présenté dans les chapitres III et IV. Les autres étapes de ce cadre sont amenées à être outillées via les travaux conduits dans le projet ANR ARBRE.

D'un point de vue développement, des évolutions de l'outil de déduction sont d'ores et déjà en cours. En effet, une plateforme facilitant l'accès à la collecte, à la saisie et à la maintenance des données et à la modélisation du processus métier est en cours de développement par Anastasia Roth, post-doctorante sur le projet ARBRE. Le mécanisme de déduction sera élargi à d'autres critères pouvant être pris en compte simultanément. Il pourra également inclure des critères relatifs au savoir-être, qui est une autre dimension de la servicisation.

Des évolutions peuvent être menées concernant la collecte et la structuration de la connaissance relative aux procédés. En dépit des nombreuses ontologies développées en Génie des Procédés présentées dans le chapitre V, aucune d'entre elles n'aie véritablement utilisée car elles ne sont pas peuplées. En effet, la structure conceptuelle est établie mais elles ne possèdent pas ou peu d'instances. Les travaux de thèse de Yohann Chasseray ont pour objectif d'extraire automatiquement de la connaissance contenue dans des sources de données hétérogènes (documents pdf, pages web, bases de données) afin de peupler automatiquement des ontologies, et par extension instancier des méta-modèles comme celui du référentiel de procédé (Chasseray et al., 2021)

Par ailleurs, générer automatiquement les processus métiers suivant un standard reconnu au niveau industriel (comme le BPMN 2.0) permettrait de faciliter la compréhension des chaînes de transformation déduites (acteurs, enchaînement des services), la prise de décision et leur mise en œuvre effective.

# Liste des figures

---

Figure 1 : Positionnement et périmètre des travaux de thèse par rapport au projet ARBRE.....	15
Figure 2 : Introduction : Schéma d'illustration de l'organisation du manuscrit .....	16
Figure I-1 : Schéma bloc général d'un procédé (vision simpliste) .....	22
Figure I-2 : Facteurs principaux influençant l'industrie de procédés .....	23
Figure I-3 : Chronologie des révolutions industrielles adaptée de (Kohler et Weisz, 2017; Vaidya et al., 2018).....	24
Figure I-4 : Caractéristiques du service selon (Kotler et Armstrong, 2018) .....	26
Figure I-5 : Comparaison entre les principes d'une raffinerie pétrochimique et d'une bioraffinerie selon (Kamm et al., 2016) .....	33
Figure I-6 : Thématiques de travail pour la mise en œuvre de l'agilité dans le Génie des Procédés, dans un environnement instable .....	34
Figure II-1 : Évolution de la fréquence d'apparition du terme agilité associé aux processus et aux systèmes .....	36
Figure II-2 : Répartition des publications traitant de l'agilité par secteur d'activité d'après une analyse effectuée avec l'outil "Results Analysis" de Web Of Science.....	37
Figure II-3 : Expression de l'agilité selon (Barthe-Delanoë et al., 2014) et (Bénaben et Vernadat., 2017) .....	39
Figure II-4 : Mots ou groupes de mot apparentés à l'agilité avec le logiciel VOSviewer .....	41
Figure III-1 : Thématiques de travail et concepts retenus pour conceptualiser l'agilité dans l'industrie de procédés .....	60
Figure III-2 : Taxonomie partielle des réseaux collaboratifs adaptée de (Camarinha-Matos et al., 2017, 2019, Camarinha-Matos et Afsarmanesh, 2005).....	61
Figure III-3 : Classification des concepts relatifs à une offre intégrée de biens et de service adaptée de (Dahmani, 2015) .....	64
Figure III-4 : Relation chaîne de transformation-service adaptée de (Bork et al., 2016; Goedkoop et al., 1999; Karagiannis, 2019) .....	67
Figure III-5 : Représentation de l'écosystème de l'industrie de procédé.....	68
Figure III-6 : Illustration de la mise en œuvre de l'agilité dans l'industrie de procédés .....	69
Figure III-7 : Caractérisation de l'apport d'agilité dans la chaîne de transformation de la matière selon les travaux de (Montarnal, 2015) (adaptation du cadre) .....	71
Figure III-8 : Vue globale du cadre méthodologique proposé dans le cadre de ces travaux .....	72
Figure IV-1 : Cadre méthodologique centré sur la modélisation et la structuration de la connaissance de l'écosystème .....	74
Figure IV-2 : Lien entre donnée, information et connaissance adapté de (Rowley, 2007).....	75
Figure IV-3 : Actigramme et décomposition hiérarchique selon (Ross, 1977).....	77
Figure IV-4 : Niveau de modélisation selon l'OMG adapté de (Bézivin, 2004).....	80
Figure IV-5 : Vue de notre cadre méthodologique centré sur la modélisation de l'environnement de la collaboration.....	81
Figure IV-6 : Structure du méta-modèle de collaboration adapté de (Bénaben, 2012) .....	85
Figure IV-7 : Méta-modèle CORE adapté selon (Bénaben et al., 2016) .....	86
Figure IV-8 : Méta-modèle de la situation collaborative pour la transformation de la biomasse .....	87
Figure IV-9 : Famille de concepts relatif au contexte du méta-modèle de l'environnement du procédé .....	87
Figure IV-10 : Différents types de gisements de biomasse de (AREC, 2009) .....	88
Figure IV-11 : Famille de concepts relative aux partenaires.....	90
Figure IV-12 : Famille de concepts relatif à l'objectif .....	91
Figure IV-13 : Famille de concepts relatif à la performance.....	92

Figure IV-14 : Vue de notre cadre méthodologique centré sur la modélisation du de l'environnement de la collaboration .....	93
Figure IV-15 : Méta-modèle pour la gestion de projet de conception d'un procédé chimique selon (Eggersmann et al., 2000) .....	94
Figure IV-16 : Méta-modèle pour la structuration de la connaissance du procédé .....	94
Figure IV-17 : Illustration de la décomposition d'un procédé .....	95
Figure IV-18 : Description du processus de biométhanisation à partir d'une instance du méta-modèle du procédé.....	96
Figure IV-19 : Cadre méthodologique découvrant les étapes de la modélisation et de la structuration de la connaissance.....	98
Figure V-1 : Cadre méthodologique de la mise en œuvre de l'agilité : phase de traitement de la connaissance, périmètre d'étude du chapitre IV.....	100
Figure V-2 : Mode de raisonnement adopté pour la déduction de la chaîne de transformation de la matière .....	101
Figure V-3: Taxonomie des exigences adaptée de (Afreen et al., 2015; Glinz, 2007).....	103
Figure V-4 : Problème de réconciliation sémantique entre l'approche théorique d'exécution des procédés et l'approche terrain du savoir-faire des acteurs adapté de (Bénaben et al., 2013) .....	105
Figure V-5 : Schéma de notre proposition de mécanisme de déduction pour la chaîne de transformation de la matière.....	112
Figure V-6 : Vision du cadre méthodologique outillé centrée sur l'étape de déduction de la chaîne de transformation.....	112
Figure V-7 : Modèle conceptuel de données pour la chaîne de transformation de la matière.....	113
Figure V-8 : Illustration schématique du modèle entité association.....	114
Figure V-9 : Logigramme traitement préliminaire des données .....	116
Figure V-10 : Logigramme présentant la logique de déduction de la superstructure de procédé.....	117
Figure V-11 : Superstructure de procédés.....	118
Figure V-12 : Logigramme de sélection du service logistique de transport .....	120
Figure V-13 : Logigramme de sélection du service logistique de stockage et de transport .....	120
Figure V-14 : Vision du cadre méthodologique outillé centrée sur l'étape de modélisation métier....	121
Figure V-15 : Cadre méthodologique détaillé pour la partie traitement de la connaissance.....	124
Figure VI-1 : Architecture technique du prototype logiciel .....	126
Figure VI-2 : Localisation du cas d'étude.....	127
Figure VI-3 : Rappel du méta-modèle de la situation collaborative pour la transformation de la biomasse .....	128
Figure VI-4 : Recherche de données .....	129
Figure VI-5 : Modèle de situation de la famille de concepts relative au contexte, de l'étude de cas ..	130
Figure VI-6 : Modèle du partenaire Agriculteur A avec ses neuf services de transformation et ses deux services logistiques .....	131
Figure VI-7 : Modèle de l'objectif de l'étude de cas .....	133
Figure VI-8 : Modèles de performance de l'étude de cas.....	134
Figure VI-9 : Rappel du méta-modèle de la connaissance du procédé .....	136
Figure VI-10 : Procédé de fabrication de GNC selon le méta-modèle de référence du procédé .....	136
Figure VI-11 : Extrait du référentiel de procédés utilisé pour le cas d'étude.....	139
Figure VI-12 : Capture d'écran du code du logiciel portant sur la recherche d'activités pertinentes avec l'exemple des déchets verts en matière première et du compost normé en produit final.....	139
Figure VI-13 : Localisation géographique des acteurs du cas d'étude .....	142
Figure VI-14 : Capture d'écran de chaînes logistiques proposées par le logiciel de déduction dans le cas de l'obtention du compost.....	144
Figure VI-15 : Capture d'écran de chaînes logistiques proposées par le logiciel de déduction dans le cas de l'obtention des plaquettes .....	145
Figure 70 : Concepts supportant l'agilité pour l'industrie de procédés .....	155
Figure 71 : Cadre méthodologique pour la mise en œuvre de l'agilité .....	156

# Liste des tableaux

---

Tableau I-1 : Sélection de programmes faisant référence à la quatrième révolution industrielle dans le monde (Danjou et al., 2017; Hermann et al., 2016).....	24
Tableau II-1 : Paramètres de recherche de l'agilité des processus et des systèmes sur les bases documentaires Science Direct et Web Of Science.....	36
Tableau II-2 : Tableau synthétique des aspects clés des définitions de l'agilité dans l'industrie manufacturière.....	38
Tableau II-3 : Paramètres de recherches pour l'affinage de la recherche bibliographique sur la base documentaire Web Of Science.....	40
Tableau II-4 : Évaluation des concepts similaires à l'agilité par rapport à notre vision de l'agilité.....	43
Tableau II-5 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de la flexibilité en Génie des procédés.....	44
Tableau II-6 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de la modularité en Génie des procédés.....	46
Tableau II-7 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de l'agilité dans la production manufacturière .....	48
Tableau II-8 : Récapitulatif des méthodologies et outils issus de la revue de littérature pour la mise en œuvre de l'agilité dans les chaînes logistiques .....	51
Tableau IV-1 : Récapitulatif des modèles de collaboration génériques selon les caractéristiques de la collaboration définies par (Montarnal, 2015).....	84
Tableau V-1 : Exigences non fonctionnelles appliquées au procédé adapté de (Kantor et al., 2019; Montarnal, 2015).....	104
Tableau V-2 : Dédution de processus dans différents domaines métiers .....	108
Tableau V-3 : Dédution de processus pour une collaboration selon les critères de déduction pour l'apport d'agilité .....	110
Tableau V-4 : Notre approche de déduction pour le procédé .....	111
Tableau V-5 : Tableau comportant la liste des activités du référentiel de procédés.....	115
Tableau V-6: Tableau matching activité-service .....	115
Tableau V-7 : Tableau service activité.....	116
Tableau V-8 : Illustration du contenu de du tableau de procédés .....	118
Tableau V-9 : Tableau de synthèse des méthodes de modélisation selon (Tangkawarow et Waworuntu, 2016).....	122
Tableau VI-1 : Caractéristiques des territoires INSEE 2017 .....	127
Tableau VI-2 : Description des acteurs du territoire et de leurs services pertinents dans le cadre de la valorisation de la biomasse .....	132
Tableau VI-3 : Tableau du nombre de services pouvant réaliser une activité du référentiel de procédés .....	133
Tableau VI-4 : Procédés compris dans le référentiel de procédés .....	135
Tableau VI-5 : Exemples de caractéristiques physico-chimiques des flux du procédé de fabrication de bio-méthane .....	137
Tableau VI-6 : Caractéristiques opératoires des activités de fabrication de bio-méthane.....	138
Tableau VI-7 : Pertinence des procédés contenus dans le référentiel de procédés en fonction de la matière première et du produit final .....	140
Tableau VI-8 : Superstructures possibles du cas d'étude .....	140
Tableau VI-9 : Liste des services de l'Agriculteur A pouvant réaliser une activité du procédé retenu.	141
Tableau VI-10 : Résultats de la déduction du (des) procédé(s) pour le cas d'étude.....	141
Tableau VI-11 : Résultats des procédés déduits et des chaînes de transformation obtenues avec l'application du filtre géographique .....	142

Tableau VI-12 : Résultats obtenus à l'issue du filtre temporel concernant la disponibilité des services de transformation pour les procédés de compostage et de production des plaquettes .....	143
Tableau VI-13 : Résultats obtenus à l'issue du filtre temporel concernant la disponibilité des flux pour les procédés de compostage et de production des plaquettes .....	143
Tableau VI-14 : Résultats obtenus à l'issue du filtre de production concernant la nature des flux pour les procédés de compostage et de production des plaquettes .....	144
Tableau VI-15 : Impact du changement de la disponibilité du service de broyage proposé par la plateforme de valorisation sur les solutions données par le programme .....	146
Tableau VI-16 : Impact du changement de la disponibilité du service récolte proposé par la plateforme de valorisation sur les solutions données par le programme.....	146
Tableau VI-17 : Impact du changement de la disponibilité du service de transport proposé par l'entreprise PERRENOT .....	147
Tableau VI-18 : Impact de l'ajout d'un nouveau service de transformation proposé par la déchèterie SIVOM de Sanguinet.....	147
Tableau VI-19 : Impacts du retrait des services proposés par la déchèterie Sanguinet .....	148
Tableau VI-20 : Impact de l'ajout l'instabilité de l'approvisionnement en termes de qualité.....	148
Tableau VI-21 : Impact de l'ajout l'instabilité de l'approvisionnement en termes d'offre et de demande .....	149
Tableau VI-22 : Évolution du nombre de procédés pertinents et de chaînes de transformation associés .....	149

# Références bibliographiques

---

- ADEME. (2008). *Référentiel combustible bois énergie : les plaquettes forestières - Définition et exigences*. <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/referentiels-combustibles-bois-energie-plaquettes-forestieres-200804.pdf>
- ADEME. (2014). *Bois énergie: l'approvisionnement en plaquettes forestières*. ADEME EDP sciences.
- ADEME. (2015). *Le compostage*.
- ADEME, ATEMIS, Vuidel, P. et Pasquelin, B. (2017). *Vers une économie de la fonctionnalité à haute valeur environnementale et sociale en 2050. Les dynamiques servicielles et territoriale au coeur du nouveau modèle*. Synthèse. [http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/prospective\\_ef\\_201705\\_synthese.pdf](http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/prospective_ef_201705_synthese.pdf)
- AFNOR. (2006). NF X50-600. <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-x50-600/management-logistique-demarche-logistique-et-gestion-de-la-chaine-logistique/article/702739/fa137573>
- AFNOR. (2013). Management par la valeur - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit NF EN 16271. <https://www.boutique.afnor.org/norme/nf-en-16271/management-par-la-valeur-expression-fonctionnelle-du-besoin-et-cahier-des-charges-fonctionnel-exigences-pour-l-expression-et-la-article/669103/fa164075>
- Afreen, N., Khatoun, A. et Sadiq, M. (2015, 24 juillet). *A Taxonomy of Software's Non-functional Requirements*. IC3T 2015, Hyderabad, India (vol. 1, p. 47-53). [https://www.researchgate.net/profile/Sudipta\\_Roy4/publication/281841250\\_Segmentation\\_of\\_the\\_Human\\_Corpus\\_Callosum\\_Variability\\_from\\_T1\\_Weighted\\_MRI\\_of\\_Brain/links/593e108da6fdcc17a95a3818/Segmentation-of-the-Human-Corpus-Callosum-Variability-from-T1-Weighted-MRI-of-Brain.pdf#page=68](https://www.researchgate.net/profile/Sudipta_Roy4/publication/281841250_Segmentation_of_the_Human_Corpus_Callosum_Variability_from_T1_Weighted_MRI_of_Brain/links/593e108da6fdcc17a95a3818/Segmentation-of-the-Human-Corpus-Callosum-Variability-from-T1-Weighted-MRI-of-Brain.pdf#page=68)
- Afsarmanesh, H. et Camarinha-Matos, L. M. (2005). A Framework for Management of Virtual Organization Breeding Environments. Dans Luis M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh et A. Ortiz (dir.), *Collaborative Networks and Their Breeding Environments* (vol. 186, p. 35-48). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/0-387-29360-4\\_4](https://doi.org/10.1007/0-387-29360-4_4)
- Agarwal, A., Shankar, R. et Tiwari, M. K. (2007). Modeling agility of supply chain. *Industrial Marketing Management*, 36(4), 443-457. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2005.12.004>
- Ajah, A. N., Herder, P. M., Grievink, J. et Weijnen, M. P. C. (2005). Framework for proper integration of flexibility in conceptual designs of energy and industrial infrastructures. Dans *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 20, p. 781-786). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(05\)80252-4](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(05)80252-4)
- Akhavej, F. et Kreuzer, P. (2016). *An approach to increase the agility in single-item production systems*. B. Katalinic (dir.), Vienna (vol. 15).
- Al-Ajlan, A. (2015). The Comparison between Forward and Backward Chaining. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 5(2), 106-113. <https://doi.org/10.7763/IJMLC.2015.V5.492>
- Alcácer, V. et Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899-919. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>
- Allen, K. R. et Carlson-Skalak, S. (1998). *Defining product architecture during conceptual design*. Atlanta, GA.
- Anantpinijwatna, A., Sales-Cruz, M., Kim, S. H., O'Connell, J. P. et Gani, R. (2016). A systematic modelling framework for phase transfer catalyst systems. *Chemical Engineering Research & Design*, 115, 407-422. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.07.011>

- Andriankaja, H., Boucher, X. et Medini, K. (2018). A method to design integrated product-service systems based on the extended functional analysis approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, 120-139. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.02.001>
- Annarelli, A., Battistella, C. et Nonino, F. (2016). Product service system: A conceptual framework from a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1011-1032. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.061>
- AREC. (2009). *Mission d'Observation de la Biomasse en Poitou-Charentes - Etat des lieux des gisements de biomasse au 30 novembre 2009*.
- Badreau, S., Boulanger, J.-L. et Roques, P. (2014). *Ingénierie des exigences: méthodes et bonnes pratiques pour construire et maintenir un référentiel / Stéphane Badreau,... Jean-Louis Boulanger,.. ; préface de Pascal Roques,..* Dunod.
- Baines, T. S., Lightfoot, H. W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., Peppard, J., Roy, R., Shehab, E., Braganza, A., Tiwari, A., Alcock, J. R., Angus, J. P., Bastl, M., Cousens, A., Irving, P., Johnson, M., Kingston, J., Lockett, H., Martinez, V., ... Wilson, H. (2007). State-of-the-art in product-service systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 221(10), 1543-1552. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM858>
- Baines, T., Ziaee Bigdeli, A., Sousa, R. et Schroeder, A. (2020). Framing the servitization transformation process: A model to understand and facilitate the servitization journey. *International Journal of Production Economics*, 221, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.07.036>
- Bakshi, B. R. et Fiksel, J. (2003). The quest for sustainability: Challenges for process systems engineering. *AIChE Journal*, 49(6), 1350-1358. <https://doi.org/10.1002/aic.690490602>
- Balaji, M., Velmurugan, V., Sivabalan, G., Ilayaraja, V. S., Prapa, M. et Mythily, V. (2014). ASCTM Approach for Enterprise Agility. *Procedia Engineering*, 97, 2222-2231. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.466>
- Baldea, M., Edgar, T. F., Stanley, B. L. et Kiss, A. A. (2017). Modular manufacturing processes: Status, challenges, and opportunities. *AIChE Journal*, 63(10), 4262-4272. <https://doi.org/10.1002/aic.15872>
- Baldissera, T. A. et Camarinha-Matos, L. M. (2016). Towards a Collaborative Business Ecosystem for Elderly Care. Dans Luis M. Camarinha-Matos, A. J. Falcão, N. Vafaei et S. Najdi (dir.), *Technological Innovation for Cyber-Physical Systems* (vol. 470, p. 24-34). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4_3)
- Ballot, E. et Montreuil, B. (2014). *L'Internet physique : Le réseau des réseaux des prestations logistiques*. La Documentation française.
- Barata, J. et Camarinha-Matos, L. M. (2003). Coalitions of manufacturing components for shop floor agility - the CoBASA architecture. *International Journal of Networking and Virtual Organisations*, 2(1), 50. <https://doi.org/10.1504/IJNVO.2003.003518>
- Barata, J., Ribeiro, L. et Onori, M. (2007, juin). *Diagnosis on Evolvable Production Systems*. 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (p. 3221-3226). <https://doi.org/10.1109/ISIE.2007.4375131>
- Barbosa-Povoa, A. P. et Pinto, J. M. (2020). Process supply chains: Perspectives from academia and industry. *Computers & Chemical Engineering*, 132, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106606>
- Barthe-Delanoë, A.-M., Truptil, S., Bénaben, F. et Pingaud, H. (2014). Event-driven agility of interoperability during the Run-time of collaborative processes. *Decision Support Systems*, 59, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.11.005>
- Ben Naylor, J., Naim, M. M. et Berry, D. (1999). Leagility: Integrating the lean and agile manufacturing paradigms in the total supply chain. *International Journal of Production Economics*, 62(1), 107-118. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00223-0](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00223-0)
- Bénaben, F., Boissel-Dallier, N., Pingaud, H. et Lorre, J.-P. (2013). Semantic issues in model-driven management of information system interoperability. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(11), 1042-1053. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.684712>

- Bénaben, F., Lauras, M., Truptil, S. et Salatgé, N. (2016, janvier). *A Metamodel for Knowledge Management in Crisis Management*. 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) (p. 126-135). <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.24>
- Bénaben, F. et Vernadat, F. B. (2017). Information System agility to support collaborative organisations. *Enterprise Information Systems*, 11(4), 470-473. <https://doi.org/10.1080/17517575.2016.1269367>
- Beynon-Davies, P., Carne, C., Mackay, H. et Tudhope, D. (1999). Rapid application development (RAD): an empirical review. *European Journal of Information Systems*, 8(3), 211-223. <https://doi.org/10.1057/palgrave.ejis.3000325>
- Bézivin, J. (2004). In Search of a Basic Principle for Model Driven Engineering. *UPGRADE*, V(2), 4.
- Bhadriraju, B., Narasingam, A. et Kwon, J. S.-I. (2019). Machine learning-based adaptive model identification of systems: Application to a chemical process. *Chemical Engineering Research and Design*, 152, 372-383. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.009>
- Bieringer, T., Buchholz, S. et Kockmann, N. (2013). Future Production Concepts in the Chemical Industry: Modular – Small-Scale – Continuous. *Chemical Engineering & Technology*, 36(6), 900-910. <https://doi.org/10.1002/ceat.201200631>
- Bogle, I. D. L. (2017). A Perspective on Smart Process Manufacturing Research Challenges for Process Systems Engineers. *Engineering*, 3(2), 161-165. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.02.003>
- Boissel-Dallier, N. (2012). *Réconciliation sémantique des données et des services mis en oeuvre au sein d'une situation collaborative* [thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse]. <http://ethesis.inp-toulouse.fr/archive/00002270/>
- Borangiu, T. (2009). A Service-Orientated Architecture for Holonic Manufacturing Control. Dans I. J. Rudas, J. Fodor et J. Kacprzyk (dir.), *Towards Intelligent Engineering and Information Technology* (p. 489-503). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-03737-5\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-642-03737-5_35)
- Borangiu, T., Gilbert, P., Ivanescu, N.-A. et Rosu, A. (2009). An implementing framework for holonic manufacturing control with multiple robot-vision stations. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(4), 505-521. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.03.001>
- Borangiu, T., Raileanu, S., Rosu, A., Parlea, M. et Anton, F. D. (2009). Management of changes in a holonic manufacturing system with dual-horizon dynamic rescheduling of production orders. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(4), 624-629. <https://doi.org/10.3182/20090603-3-RU-2001.0139>
- Bork, D., Buchmann, R., Hawryszkiewicz, I., Karagiannis, D., Tantouris, N. et Walch, M. (2016, décembre). *Using Conceptual Modeling to Support Innovation Challenges in Smart Cities*. 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 14th International Conference on Smart City; IEEE 2nd International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS) (p. 1317-1324). <https://doi.org/10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0187>
- Borst, W.N. (1997, 5 septembre). *Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse* [Centre for Telematics and Information Technology (CTIT)]. [https://research.utwente.nl/en/publications/construction-of-engineering-ontologies-for-knowledge-sharing-and-reuse\(f25ea3c6-f4b7-43cd-90c1-50926bbcf3db\).html](https://research.utwente.nl/en/publications/construction-of-engineering-ontologies-for-knowledge-sharing-and-reuse(f25ea3c6-f4b7-43cd-90c1-50926bbcf3db).html)
- Bortolini, M., Galizia, F. G. et Mora, C. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Literature review and research trend. *Journal of Manufacturing Systems*, 49, 93-106. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.09.005>
- Bowling, I. M., Ponce-Ortega, J. M. et El-Halwagi, M. M. (2011). Facility Location and Supply Chain Optimization for a Biorefinery. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(10), 6276-6286. <https://doi.org/10.1021/ie101921y>
- Brax, S. A. et Visintin, F. (2017). Meta-model of servitization: The integrative profiling approach. *Industrial Marketing Management*, 60, 17-32. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2016.04.014>
- Buschak, D. et Lay, G. (2014). Chemical Industry: Servitization in Niches. Dans *Servitization in industry*. Springer.

- Camarinha-Matos, L. M., Afsarmanesh, H. et Rabelo, R. (2000). *Supporting Agility in Virtual Enterprises*. Working Conference on Virtual Enterprises (p. 89-104). [https://doi.org/10.1007/978-0-387-35399-9\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-387-35399-9_9)
- Camarinha-Matos, Luis M. (2009). Collaborative networked organizations: Status and trends in manufacturing. *Annual Reviews in Control*, 33(2), 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2009.05.006>
- Camarinha-Matos, Luis M. (2014). Collaborative Networks: A Mechanism for Enterprise Agility and Resilience. Dans *Enterprise Interoperability VI* (p. 3-11). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-04948-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04948-9_1)
- Camarinha-Matos, Luis M. et Afsarmanesh, H. (2005). Collaborative networks: a new scientific discipline. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 16(4), 439-452. <https://doi.org/10.1007/s10845-005-1656-3>
- Camarinha-Matos, Luis M. et Afsarmanesh, H. (2008). On reference models for collaborative networked organizations. *International Journal of Production Research*, 46(9), 2453-2469. <https://doi.org/10.1080/00207540701737666>
- Camarinha-Matos, Luis M., Fornasiero, R. et Afsarmanesh, H. (2017, 18 septembre). *Collaborative Networks as a Core Enabler of Industry 4.0*. Working Conference on Virtual Enterprises (p. 3-17). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-65151-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-65151-4_1)
- Camarinha-Matos, Luis M., Fornasiero, R., Ramezani, J. et Ferrada, F. (2019). Collaborative Networks: A Pillar of Digital Transformation. *Applied Sciences*, 9(24), 5431. <https://doi.org/10.3390/app9245431>
- Cao, C. (2017). Sustainability and life assessment of high strength natural fibre composites in construction. Dans M. Fan et F. Fu (dir.), *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction* (p. 529-544). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00021-2>
- Cardona Alzate, C. A., Solarte Toro, J. C. et Peña, Á. G. (2018). Fermentation, thermochemical and catalytic processes in the transformation of biomass through efficient biorefineries. *Catalysis Today*, 302, 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2017.09.034>
- Catalán, C., Serna, F., Blesa, A., Colom, J. M. et Rams, J. M. (2011, septembre). *COSME: A distributed control platform for communicating machine tools in Agile Manufacturing Systems*. ETFA2011 (p. 1-8). <https://doi.org/10.1109/ETFA.2011.6059115>
- Cavaleri, S. et Pezzotta, G. (2012). Product–Service Systems Engineering: State of the art and research challenges. *Computers in Industry*, 63(4), 278-288. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.02.006>
- Chan, A. T. L., Ngai, E. W. T. et Moon, K. K. L. (2017). The effects of strategic and manufacturing flexibilities and supply chain agility on firm performance in the fashion industry. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 486-499. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.006>
- Chan, F. T. S. (2001). The effects of routing flexibility on a flexible manufacturing system. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 14(5), 431-445. <https://doi.org/10.1080/09591120010021793>
- Chan, F. T. S. (2002). Evaluation of combined dispatching and routing strategies for a flexible manufacturing system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 216(7), 1033-1046. <https://doi.org/10.1243/09544050260174229>
- Chasseray, Y., Barthe-Delanoë, A.-M., Negny, S. et Le Lann, J. M. (2021). A generic metamodel for data extraction and generic ontology population. *Journal of Information Science*, 13 p, In press.
- Chavarría-Barrientos, D., Molina Espinosa, J. M., Batres, R., Ramírez-Cadena, M. et Molina, A. (2015). *Reference Model for Smart x Sensing Manufacturing Collaborative Networks - Formalization Using Unified Modeling Language*. Luis M. Camarinha-Matos, F. Bénaben et W. Picard (dir.), Cham (p. 243-254). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24141-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24141-8_22)
- Chen, C., Guo, W., Ngo, H. H., Lee, D.-J., Tung, K.-L., Jin, P., Wang, J. et Wu, Y. (2016). Challenges in biogas production from anaerobic membrane bioreactors. *Renewable Energy*, 98, 120-134. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.095>

- Chen, D. et Ducq, Y. (2015, mai). *A Methodology for Manufacturing Servitization Engineering*. 2015 International Conference on Service Science (ICSS) (p. 141-147). <https://doi.org/10.1109/ICSS.2015.43>
- Chen, D. et Gusmeroli, S. (2015). Framework for Manufacturing Servitization in Virtual Enterprise Environment and Ecosystem. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 2244-2249. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.422>
- Chen, P. P.-S. (1976). The entity-relationship model - toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*, 1(1), 9-36. <https://doi.org/10.1145/320434.320440>
- Chen, Y., Yuan, Z. et Chen, B. (2018). A Novel Method of Integrating Flexibility and Stability for Chemical Processes under Parametric Uncertainties. Dans M. Eden, M. G. Lerapetritou et G. P. Towler (dir.), *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 44, p. 211-216). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64241-7.50030-6>
- Chertow, M. R. (2007). "Uncovering" Industrial Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1), 11-30. <https://doi.org/10.1162/jiec.2007.1110>
- Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412-1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- Christopher, M. (1999). Les enjeux d'une Supply Chain globale. *Logistique & Management*, 7(1), 3-6. <https://doi.org/10.1080/12507970.1999.11516692>
- Christopher, M. (2000). The Agile Supply Chain: Competing in Volatile Markets. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 37-44. [https://doi.org/10.1016/S0019-8501\(99\)00110-8](https://doi.org/10.1016/S0019-8501(99)00110-8)
- Christopher, M. et Towill, D. (2001). An integrated model for the design of agile supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 31(4), 235-246. <https://doi.org/10.1108/09600030110394914>
- Christopher, M. et Towill, D. R. (2000). Supply chain migration from lean and functional to agile and customised. *Supply Chain Management: An International Journal*, 5(4), 206-213. <https://doi.org/10.1108/13598540010347334>
- Chuang, S.-W., Luor, T. et Lu, H.-P. (2014). Assessment of institutions, scholars, and contributions on agile software development (2001–2012). *Journal of Systems and Software*, 93, 84-101. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2014.03.006>
- Chungoora, N. et Young, R. I. M. (2011). Semantic reconciliation across design and manufacturing knowledge models: A logic-based approach. *Applied Ontology*, 6(4), 295-315. <https://doi.org/10.3233/AO-2011-0092>
- Clark, J. H. et Deswarte, F. (2014). *Introduction to Chemicals from Biomass*. John Wiley & Sons.
- Combemale, B. (2008). Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) – État de l'art, 20.
- Conboy, K. (2009). Agility from First Principles: Reconstructing the Concept of Agility in Information Systems Development. *Information Systems Research*, 20(3), 329-354. <https://doi.org/10.1287/isre.1090.0236>
- Costantino, N., Dotoli, M., Falagario, M., Fanti, M. P. et Mangini, A. M. (2012). A model for supply management of agile manufacturing supply chains. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 451-457. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.08.021>
- Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R. et Doré, T. (2012). MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. Présentation & principes. *Innovations Agronomiques*, 20, 35-48.
- Craheix, D., Angevin, F., Doré, T. et De Tourdonnet, S. (2016). Using a multicriteria assessment model to evaluate the sustainability of conservation agriculture at the cropping system level in France. *European Journal of Agronomy*, 76, 75-86. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.02.002>
- Crispim, J., Rego, N. et Pinho de Sousa, J. (2015). Stochastic partner selection for virtual enterprises: a chance-constrained approach. *International Journal of Production Research*, 53(12), 3661-3677. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.986301>

- D'Agostin, A., de Medeiros, J. F., Vidor, G., Zulpo, M. et Moretto, C. F. (2020). Drivers and barriers for the adoption of use-oriented product-service systems: A study with young consumers in medium and small cities. *Sustainable Production and Consumption*, 21, 92-103. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.11.002>
- Dahmani, S. (2015). *Proposition d'un cadre méthodologique pour la gestion du processus de servicisation en entreprise industrielle : approche basée sur les risques décisionnels* [thèse, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01258186>
- Dalkir, K. (2017). *Knowledge Management in Theory and Practice*. MIT Press.
- Danjou, C., Rivest, L. et Pellerin, R. (2017). *Douze positionnements stratégiques pour l'Industrie 4.0 : entre processus, produit et service, de la surveillance à l'autonomie*. CIGI 2017, Compiègne, France. [http://aeroets.etsmtl.ca/documents/about/CIGI\\_2017\\_Danjou\\_Rivest\\_Pellerin.pdf](http://aeroets.etsmtl.ca/documents/about/CIGI_2017_Danjou_Rivest_Pellerin.pdf)
- Davis, E. W. et Spekman, R. E. (2004). *The Extended Enterprise: Gaining Competitive Advantage Through Collaborative Supply Chains*. FT Press.
- Di Pretoro, A., Montastruc, L., Manenti, F. et Joulia, X. (2019). Flexibility analysis of a distillation column: Indexes comparison and economic assessment. *Computers & Chemical Engineering*, 124, 93-108. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.02.004>
- Diegmann, P., Dreesen, T., Binzer, B. et Rosenkranz, C. (2018, 14 décembre). *Journey towards agility: Three decades of research on agile information systems development*. Bridging the Internet of People, Data, and Things : 39th International Conference on Information Systems (ICIS 2018) : San Francisco, California, USA, 13-16 December 2018, San Francisco. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-85062505759&partnerID=MN8TOARS>
- Dieterich, E. E. et Eigenberger, G. (1997). The ModuSim concept for modular modeling and simulation in chemical engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 21, S805-S809. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(97\)87601-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(97)87601-6)
- Ding, B. (2018). Pharma Industry 4.0: Literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains. *Process Safety and Environmental Protection*, 119, 115-130. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.031>
- Dijkerman, J. C. (1974). Pedology as a science: The role of data, models and theories in the study of natural soil systems. *Geoderma*, 11(2), 73-93.
- Donnadieu, G. et Karsky, M. (2002). *La systémique, penser et agir dans la complexité*. Liaisons.
- Doumeingts, G. et Ducq, Y. (2001). Enterprise modelling techniques to improve efficiency of enterprises. *Production Planning & Control*, 12(2), 146-163. <https://doi.org/10.1080/09537280150501257>
- Drame, K. (2014). *Contribution à la construction d'ontologies et à la recherche d'information: application au domaine médical*. Université de Bordeaux.
- Duan, L. et Xu, L. D. (2012). Business Intelligence for Enterprise Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(3), 679-687. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2188804>
- Dubey, R., Altay, N., Gunasekaran, A., Blome, C., Papadopoulos, T. et Childe, S. J. (2018). Supply chain agility, adaptability and alignment: Empirical evidence from the Indian auto components industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(1), 129-148. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-04-2016-0173>
- Ducq, Y., Chen, D. et Alix, T. (2012, 6 septembre). *Principles of Servitization and Definition of an Architecture for Model Driven Service System Engineering*. International IFIP Working Conference on Enterprise Interoperability (p. 117-128). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-33068-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-33068-1_12)
- Durugbo, C. (2016). Collaborative networks: a systematic review and multi-level framework. *International Journal of Production Research*, 54(12), 3749-3776. <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1122249>
- Eggersmann, M., Krobb, C. et Marquardt, W. (2000). *A Modeling Language for Design Processes in Chemical Engineering*. A. H. F. Laender, S. W. Liddle et V. C. Storey (dir.), Berlin, Heidelberg (p. 369-382). [https://doi.org/10.1007/3-540-45393-8\\_27](https://doi.org/10.1007/3-540-45393-8_27)

- Eilermann, M., Post, C., Radatz, H., Bramsiepe, C. et Schembecker, G. (2018). A general approach to module-based plant design. *Chemical Engineering Research & Design*, 137, 125-140. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.06.039>
- Eilermann, M., Post, C., Schwarz, D., Leufke, S., Schembecker, G. et Bramsiepe, C. (2017). Generation of an equipment module database for heat exchangers by cluster analysis of industrial applications. *Chemical Engineering Science*, 167, 278-287. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.03.064>
- El Maraghy, H. A. (2019). Smart changeable manufacturing systems. *Procedia Manufacturing*, 28, 3-9. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.002>
- Farahani, R. Z., Rezapour, S., Drezner, T. et Fallah, S. (2014). Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. *Omega*, 45, 92-118. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2013.08.006>
- Favre, J. (2004). *Towards a Basic Theory to Model Model Driven Engineering*.
- Fayezi, S., Zutshi, A. et O'Loughlin, A. (2017). Understanding and Development of Supply Chain Agility and Flexibility: A Structured Literature Review. *International Journal of Management Reviews*, 19(4), 379-407. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12096>
- Fayoumi, A. (2016). Ecosystem-inspired enterprise modelling framework for collaborative and networked manufacturing systems. *Computers in Industry*, 80, 54-68. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.04.003>
- Fernando, S., Adhikari, S., Chandrapal, C. et Murali, N. (2006). Biorefineries: Current Status, Challenges, and Future Direction. *Energy & Fuels*, 20(4), 1727-1737. <https://doi.org/10.1021/ef060097w>
- Ferrada, F. et Camarinha-Matos, L. M. (2019). A modelling framework for collaborative network emotions. *Enterprise Information Systems*, 13(7-8), 1164-1194. <https://doi.org/10.1080/17517575.2019.1633583>
- Fertier, A., Montarnal, A., Barthe-Delanoë, A.-M., Truptil, S. et Bénaben, F. (2019). Real-time data exploitation supported by model- and event-driven architecture to enhance situation awareness, application to crisis management. *Enterprise Information Systems*, 0(0), 1-28. <https://doi.org/10.1080/17517575.2019.1691268>
- Fliedner, G. et Vokurka, R. J. (1997). Agility : Competitive weapon of the 1990s and beyond? *Production and Inventory Management Journal*, 38(3), 19-24.
- Fliess, S. et Lexutt, E. (2017). How to be successful with servitization – Guidelines for research and management. *Industrial Marketing Management*. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2017.11.012>
- Fornasiero, R. et Zangiacomì, A. (2013). A structured approach for customised production in SME collaborative networks. *International Journal of Production Research*, 51(7), 2110-2122. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.706718>
- Frank, A. G., Mendes, G. H. S., Ayala, N. F. et Ghezzi, A. (2019). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 141, 341-351. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.01.014>
- Gaglio, G., Lauriol, J. et Du Tertre, C. (2011). *L'économie de la fonctionnalité : une voie nouvelle vers un développement durable ?* <http://journals.openedition.org/lectures>. Octarès Editions. <http://journals.openedition.org/lectures/7168>
- Galli, B. J. (2018). Change Management Models: A Comparative Analysis and Concerns. *IEEE Engineering Management Review*, 46(3), 124-132. <https://doi.org/10.1109/EMR.2018.2866860>
- Galster, M., Zdun, U., Weyns, D., Rabiser, R., Zhang, B., Goedicke, M. et Perrouin, G. (2017). Variability and Complexity in Software Design: Towards a Research Agenda. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 41(6), 27-30. <https://doi.org/10.1145/3011286.3011291>
- Garcia-Maraver, A., Carpio, M. et Spain, G. (2015). Chapter 4 - Biomass Pelletization Process. Dans *WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering* (WIT Press, p. pp 53-66).

- Gartner. (2020). *5 Trends Drive the Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2020*. [//www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020/](http://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-drive-the-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020/)
- Gerbaud, V., Shcherbakova, N. et Da Cunha, S. (2020). A nonequilibrium thermodynamics perspective on nature-inspired chemical engineering processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 154, 316-330. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.037>
- Ghobadian, A., Speller, S. et Jones, M. (1994). Service Quality: Concepts and Models. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 11(9), 43-66. <https://doi.org/10.1108/02656719410074297>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Giarini, O. et Stahel, W. R. (1989). *The Limits to Certainty : Facing Risks in the New Service Economy*. Kluwer Academic Publishers.
- Giroudiere, F. (2016). Élaboration des schémas de procédés - De l'idée à l'unité industrielle. Dans *Techniques de l'Ingénieur* (p. 21).
- Glaser, L. B., Kramer, J. et Causey, E. (1979). Practical aspects of modular and baye-monted plants. *Chemical engineering progress*, 75(10), 49-55.
- Gligor, D. M. et Holcomb, M. C. (2012). Understanding the role of logistics capabilities in achieving supply chain agility: a systematic literature review. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(4), 438-453. <https://doi.org/10.1108/13598541211246594>
- Glinz, M. (2007). *On Non-Functional Requirements*. 15th IEEE International Requirements Engineering Conference (RE 2007) (p. 21-26). <https://doi.org/10.1109/RE.2007.45>
- Goedkoop, M. J., Van Halen, C. J., Te Riele, H. R. et Rommens, P. J. (1999). Product service systems, ecological and economic basics. *Report for Dutch Ministries of environment (VROM) and economic affairs (EZ)*, 36(1), 1-122.
- Goldmann, S. L., Nagel, R. N. et Preiss, K. (1995). Agile competitors and virtual organisations. Dans *Strategies for Enriching the Customers*.
- Gómez-Pérez, A., Fernandez-Lopez, M. et Corcho, O. (2006). *Ontological Engineering: with examples from the areas of Knowledge Management, e-Commerce and the Semantic Web. First Edition*. Springer Science & Business Media.
- Grigori, D., Casati, F., Castellanos, M., Dayal, U., Sayal, M. et Shan, M.-C. (2004). Business Process Intelligence. *Computers in Industry*, 53(3), 321-343. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2003.10.007>
- Gruber, T. R. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), 199-220. <https://doi.org/10.1006/knac.1993.1008>
- Guarino, N. (1998). *Formal Ontology in Information Systems: Proceedings of the First International Conference (FOIS'98), June 6-8, Trento, Italy*. IOS Press.
- Gunasekaran, A. (1997). Implementation of computer-integrated manufacturing: A survey of integration and adaptability issues. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 10(1-4), 266-280. <https://doi.org/10.1080/095119297131363>
- Gunasekaran, A. (1999). Agile manufacturing: A framework for research and development. *International Journal of Production Economics*, 62(1-2), 87-105. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00222-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00222-9)
- Gunasekaran, A., Lai, K. et Edwinceng, T. (2008). Responsive supply chain: A competitive strategy in a networked economy☆. *Omega*, 36(4), 549-564. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.12.002>
- Gunasekaran, A., Yusuf, Y. Y., Adeleye, E. O., Papadopoulos, T., Kovvuri, D. et Geyi, D. G. (2019). Agile manufacturing: an evolutionary review of practices. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 5154-5174. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1530478>
- Gupta, P. (2018). Modularity enablers: a tool for Industry 4.0. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 8(2), 157-163. <https://doi.org/10.1007/s41872-018-0067-3>

- Gupta, S., Drave, V. A., Bag, S. et Luo, Z. (2019). Leveraging Smart Supply Chain and Information System Agility for Supply Chain Flexibility. *Information Systems Frontiers*, 21(3), 547-564. <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09901-5>
- Gyarmathy, A., Peszynski, K. et Young, L. (2020). Theoretical Framework for a Local, Agile Supply Chain to Create Innovative Product Closer to End-user: Onshore-Offshore Debate. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 108-122. <https://doi.org/10.31387/oscm0410256>
- Halemane, K. P. et Grossmann, I. E. (1983). Optimal process design under uncertainty. *AIChE Journal*, 29(3), 425-433. <https://doi.org/10.1002/aic.690290312>
- Harrison, R., Colombo, A. W., West, A. A. et Lee, S. M. (2006). Reconfigurable modular automation systems for automotive power-train manufacture. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 18(3), 175-190. <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9008-y>
- Hawryszkiewicz, I. (2005). A Metamodel for Modeling Collaborative Systems I.t. Hawryszkiewicz. *Journal of Computer Information Systems*, 45(3), 63-72.
- Hayes, J. (2018). *The theory and practice of change management*. Palgrave.
- Heitmann, M., Schembecker, G. et Bramsiepe, C. (2017). Framework to decide for a volume flexible chemical plant during early phases of plant design. *Chemical Engineering Research and Design*, 128, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.09.028>
- Henry, V., Saïs, F., Inizan, O., Marchadier, E., Dibie, J., Goelzer, A. et Fromion, V. (2020). BiPOm: a rule-based ontology to represent and infer molecule knowledge from a biological process-centered viewpoint. *BMC Bioinformatics*, 21(1), 327. <https://doi.org/10.1186/s12859-020-03637-9>
- Hermann, M., Pentek, T. et Otto, B. (2016). *Design principles for industrie 4.0 scenarios* (p. 3928-3937).
- Hoch, P. M. et Eliceche, A. M. (1996). Flexibility analysis leads to a sizing strategy in distillation columns. *Computers & Chemical Engineering*, 20, S139-S144. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(96\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0098-1354(96)00034-8)
- Hohmann, L., Kössl, K., Kockmann, N., Schembecker, G. et Bramsiepe, C. (2017). Modules in process industry – A life cycle definition. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 111, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.09.017>
- Hormozi, A. M. (2001). Agile manufacturing: the next logical step. *Benchmarking: An International Journal*, 8(2), 132-143. <https://doi.org/10.1108/14635770110389843>
- Hornung, A. (2014). *Transformation of Biomass: Theory to Practice*. John Wiley & Sons.
- IEA. (2018, 28 mars). Biorefineries : adding value to the sustainable utilisation of biomass. <http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Task-42-Booklet.pdf>
- INSEE. (2016). Les fonctions de service dans l'industrie manufacturière : la moitié des emplois directs. Dans *Les entreprises en France* (Edition 2016).
- INSEE. (2019). *Les entreprises en France* (Edition 2019; édité par Institut national de la statistique et des études économiques).
- Ismail, H. S. et Sharifi, H. (2006). A balanced approach to building agile supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 36(6), 431-444. <https://doi.org/10.1108/09600030610677384>
- ISO. (2014). *ISO 10628-1:2014 : Schémas de procédé pour l'industrie chimique et pétrochimique — Partie 1: Spécification des schémas de procédé*. ISO. <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/data/standard/05/18/51840.html>
- Jacobides, M. G., Cennamo, C. et Gawer, A. (2018). Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal*, 39(8), 2255-2276. <https://doi.org/10.1002/smj.2904>
- Jacobs, M., Droge, C., Vickery, S. K. et Calantone, R. (2011). Product and Process Modularity's Effects on Manufacturing Agility and Firm Growth Performance. *Journal of Product Innovation Management*, 28(1), 123-137. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5885.2010.00785.x>
- Jepsen, T. C. (2009). Just What Is an Ontology, Anyway? *IT Professional*, 11(5), 22-27. <https://doi.org/10.1109/MITP.2009.105>

- Jézéquel Jean-Marc, Combemale Benoît, et Vojtisek Didier. (2012). *Ingénierie dirigée par les modèles: des concepts à la pratique*. Ellipses.
- Jiang, Z., Lamothe, J. et Benaben, F. (2017). A Monitoring Framework of Collaborative Supply Chain for Agility. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 13072-13077. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2007>
- Jin-Hai, L., Anderson, A. R. et Harrison, R. T. (2003). The evolution of agile manufacturing. *Business Process Management Journal*, 9(2), 170-189. <https://doi.org/10.1108/14637150310468380>
- Johansson, H., Johansson, H. J., McHugh, P., Pendlebury, A. J. et III, W. A. W. (1993). *Business Process Reengineering: Breakpoint Strategies for Market Dominance*. Wiley.
- Kaihara, T. et Fujii, S. (2002). A study on virtual enterprise coalition with multi-agent technology in agile manufacturing environment. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 01(02), 125-139. <https://doi.org/10.1142/S021968670200012X>
- Kaihara, T., Katsumura, Y., Suginishi, Y. et Kadar, B. (2017). Simulation model study for manufacturing effectiveness evaluation in crowdsourced manufacturing. *CIRP Annals*, 66(1), 445-448. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.094>
- Kajero, O. T., Chen, T., Yao, Y., Chuang, Y.-C. et Wong, D. S. H. (2017). Meta-modelling in chemical process system engineering. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 73, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.10.042>
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A. et Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>
- Kamm, B., Gruber, P. R. et Kamm, M. (2016). Biorefineries—Industrial Processes and Products. Dans *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* (p. 1-38). American Cancer Society. [https://doi.org/10.1002/14356007.l04\\_l01.pub2](https://doi.org/10.1002/14356007.l04_l01.pub2)
- Kamp, B. et Parry, G. (2017). Servitization and advanced business services as levers for competitiveness. *Industrial Marketing Management*, 60, 11-16.
- Kang, M., Kim, G., Lee, T., Jung, C. H., Eum, K., Park, M. W. et Kim, J. K. (2016). Selection and sequencing of machining processes for prismatic parts using process ontology model. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(3), 387-394. <https://doi.org/10.1007/s12541-016-0048-2>
- Kanignant, T., Suthiwartnarueput, K. et Pornchaiwiseskul, P. (2018, mai). *Servitization framework for product transition in chemical distribution*. 2018 5th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR) (p. 323-328). <https://doi.org/10.1109/ICBIR.2018.8391215>
- Kantor, I., Butun, H., Robineau, J.-L., Maqbool, S., Zwaenepoel, B., Norbert, R., Arias, S., Cervo, H., Wolf, F. et Santecchia, A. (2019). Long- and short-lists of key performance indicators in industry and for industrial symbiosis, 36.
- Kettunen, P. (2009). *Agile software development in large-scale new product development organization: team level perspective*. Teknillinen korkeakoulu. <https://aaltodoc.aalto.fi:443/handle/123456789/4694>
- Kidd, P. T. (1994). *Agile manufacturing: forging new frontiers*. Addison-Wesley.
- Kim, J., Realff, M. J. et Lee, J. H. (2011). Optimal design and global sensitivity analysis of biomass supply chain networks for biofuels under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 35(9), 1738-1751. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.02.008>
- Ko, R. K., Lee, E. W. et Lee, S. (2011). Business-OWL (BOWL)—A Hierarchical task network ontology for dynamic business process decomposition and formulation. *IEEE Transactions on Services Computing*, 5(2), 246-259.
- Koberg, E. et Longoni, A. (2019). A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 207, 1084-1098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.033>
- Kollas, C., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Manevski, K., Müller, C., Palosuo, T., Armas-Herrera, C. M., Beaudoin, N., Bindi, M., Charfeddine, M., Conradt, T., Constantin, J., Eitzinger, J., Ewert, F., Ferrise, R., Gaiser, T., Cortazar-Atauri, I. G. de, Giglio, L., Hlavinka, P., ... Wu, L. (2015). Crop

- rotation modelling—A European model intercomparison. *European Journal of Agronomy*, 70, 98-111. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2015.06.007>
- Koren, Y. (2005). *Reconfigurable manufacturing and beyond* (p. 7).
- Koren, Y. (2010). *The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems*. John Wiley & Sons.
- Kotler, P. et Armstrong, G. (2018). *Principles of marketing*.
- Kurtev, I., Bézinvin, J. et Aksit, M. (2002). *Technological Spaces: an Initial Appraisal*. 4th International Symposium on Distributed Objects and Applications, University of California, Irvine (p. 7).
- Kwon, Y., Lee, H.-K., Lee, S. et Lee, J. (2003). *The Virtual Enterprise: Redefining the Concept*. C.-W. Chung, C.-K. Kim, W. Kim, T.-W. Ling et K.-H. Song (dir.), Berlin, Heidelberg (p. 249-258). [https://doi.org/10.1007/3-540-45036-X\\_25](https://doi.org/10.1007/3-540-45036-X_25)
- Laanti, M., Similä, J. et Abrahamsson, P. (2013). *Definitions of Agile Software Development and Agility*. F. McCaffery, R. V. O'Connor et R. Messnarz (dir.), Berlin, Heidelberg (p. 247-258). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-39179-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-642-39179-8_22)
- Laínez, J. M. et Puigjaner, L. (2012). Prospective and perspective review in integrated supply chain modelling for the chemical process industry. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 1(4), 430-445. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2012.09.002>
- Le Déaut, J.-Y. (2016). *De la biomasse à la bioéconomie : Une stratégie pour la France*. Assemblée Nationale. <https://www.senat.fr/notice-rapport/2015/r15-380-notice.html>
- Le Moigne, J.-L. (1994). *La théorie du système général : Théorie de la modélisation* (Quatrième Edition). Presses Universitaires de France.
- Lee, G. et Xia, W. (2010). Toward Agile: An Integrated Analysis of Quantitative and Qualitative Field Data on Software Development Agility. *MIS Quarterly*, 34(1), 87-114. <https://doi.org/10.2307/20721416>
- Lee, H. L. (2002). Aligning Supply Chain Strategies with Product Uncertainties. *California Management Review*, 44(3), 16.
- Legrand, J. (2017, 23 mars). Quels procédés pour l'usine du futur? *CNRS Le Journal*.
- Lemieux, N. et Beauregard, M. (2015). Parallèles entre l'évolution des pratiques de gestion du changement et le changement agile. *Question(s) de management*, n° 10(2), 65-76.
- Leong, W. D., Teng, S. Y., How, B. S., Ngan, S. L., Lam, H. L., Tan, C. P. et Ponnambalam, S. G. (2019). Adaptive analytical approach to lean and green operations. *Journal of Cleaner Production*, 235, 190-209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.143>
- Lier, S., Paul, S., Ferdinand, D. et Grünwald, M. (2017). Modular Process Engineering: Development of Apparatuses for Transformable Production Systems. *ChemBioEng Reviews*, 4(1), 60-70. <https://doi.org/10.1002/cben.201600031>
- Lipphardt, G., Pilz, V., Plocker, U. et Wintermantel, K. (1993). Changes in the Structure of Engineering in the Chemical-Industry. *Chemie Ingenieur Technik*, 65(3), 265-270. <https://doi.org/10.1002/cite.330650303>
- Macedo, P., Abreu, A. et Camarinha-Matos, L. M. (2012). Modelling a Collaborative Network in the Agri-Food Sector Using ARCON Framework: The PROVE Case Study. Dans Luis M. Camarinha-Matos, L. Xu et H. Afsarmanesh (dir.), *Collaborative Networks in the Internet of Services* (vol. 380, p. 329-339). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32775-9\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32775-9_34)
- Malik, B., Pirzadah, T. B., Islam, S. T., Tahir, I., Kumar, M. et Rehman, R. ul. (2015). Biomass Pellet Technology: A Green Approach for Sustainable Development. Dans K. R. Hakeem, M. Jawaid et O. Y. Alothman (dir.), *Agricultural Biomass Based Potential Materials* (p. 403-433). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13847-3_19)
- Malone, T. W., Crowston, K. et Herman, G. A. (2003). *Organizing business knowledge: The MIT process handbook*. MIT press.
- Marche, B., Boly, V., Morel, L., Mayer, F. et Ortt, R. (2019). Agility and product supply chain design: The case of the Swatch. *Journal of Innovation Economics Management*, n° 28(1), 79-109.

- Martinez, M. T., Fouletier, P., Park, K. H. et Favrel, J. (2001). Virtual enterprise – organisation, evolution and control. *International Journal of Production Economics*, 74(1), 225-238. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(01\)00129-3](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(01)00129-3)
- Maskell, B. (2001). The age of agile manufacturing. *Supply Chain Management: An International Journal*, 6(1), 5-11. <https://doi.org/10.1108/13598540110380868>
- Mason-Jones, R., Naylor, B. et Towill, D. R. (2000). Engineering the leagile supply chain. *International Journal of Agile Management Systems*, 2(1), 54-61. <https://doi.org/10.1108/14654650010312606>
- McKenna, R. (2018). The double-edged sword of decentralized energy autonomy. *Energy Policy*, 113, 747-750. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.033>
- Meckesheimer, M., Booker, A., Barton, R. et Simpson, T. (2002). Computationally Inexpensive Metamodel Assessment Strategies. *AIAA Journal*, 40, 2053-2060. <https://doi.org/10.2514/2.1538>
- Mehralian, G., Zarenezhad, F. et Rajabzadeh Ghatari, A. (2015). Developing a model for an agile supply chain in pharmaceutical industry. *International Journal of Pharmaceutical and Healthcare Marketing*, 9(1), 74-91. <https://doi.org/10.1108/IJPHM-09-2013-0050>
- Mesnard, C. (2019). Rapport sur la recherche-action" Atelier des Landes".
- Minsky, M. (1965). *Models, minds, machines* (p. 45-49).
- Mollahoseini Ardakani, M. R., Hashemi, S. M. et Razzazi, M. (2018). Adapting the scrum methodology for establishing the dynamic inter-organizational collaboration. *Journal of Organizational Change Management*, 31(4), 852-866. <https://doi.org/10.1108/JOCM-07-2016-0135>
- Monge, A. E. et Elkan, C. P. (1996). The Field Matching Problem: Algorithms and Applications. *Kdd*, 267-270.
- Montarnal, A. (2015). *Deduction of inter-organizational collaborative business processes within an enterprise social network* [Ecole nationale des Mines d'Albi-Carmaux]. <http://www.theses.fr/2015EMAC0005>
- Montarnal, Aurelie, Mu, W., Benaben, F., Lamothe, J., Lauras, M. et Salatge, N. (2018). Automated deduction of cross-organizational collaborative business processes. *Information Sciences*, 453, 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.03.041>
- Morbach, J., Wiesner, A. et Marquardt, W. (2009). OntoCAPE—A (re)usable ontology for computer-aided process engineering. *Computers & Chemical Engineering*, 33(10), 1546-1556. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.01.019>
- Moreno, A., Velez, G., Ardanza, A., Barandiaran, I., Infante, Á. et Chopitea, R. (2017). Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 11, 365-373. <https://doi.org/10.1007/s12008-016-0319-2>
- Morin, E. (2005). *Introduction à la pensée complexe* (Nouvelle édition). Seuil.
- Mu, W., Bénaben, F. et Pingaud, H. (2015). A methodology proposal for collaborative business process elaboration using a model-driven approach. *Enterprise Information Systems*, 9(4), 349-383. <https://doi.org/10.1080/17517575.2013.771410>
- Mu, W., Bénaben, F. et Pingaud, H. (2016). Collaborative process cartography deduction based on collaborative ontology and model transformation. *Information Sciences*, 334-335, 83-102. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2015.11.033>
- Muñoz, E., Espuña, A. et Puigjaner, L. (2010). Towards an ontological infrastructure for chemical batch process management. *Computers & Chemical Engineering*, 34(5), 668-682. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.12.009>
- Nagel, R. N. et Dove, R. (1991). *21st Century Manufacturing Enterprise Strategy: An Industry-Led View*. DIANE Publishing.
- Nawaz, M., Enscore, E. E. et Ham, I. (1983). A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow-shop sequencing problem. *Omega*, 11(1), 91-95. [https://doi.org/10.1016/0305-0483\(83\)90088-9](https://doi.org/10.1016/0305-0483(83)90088-9)
- Neely, A. (2008). Exploring the financial consequences of the servitization of manufacturing. *Operations Management Research*, 1(2), 103-118. <https://doi.org/10.1007/s12063-009-0015-5>

- Ng, K. S. et Martinez Hernandez, E. (2016). A systematic framework for energetic, environmental and economic (3E) assessment and design of polygeneration systems. *Chemical Engineering Research and Design*, 106, 1-25. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.11.017>
- Nguyen, D. H. et Chen, H. (2018). Supplier selection and operation planning in biomass supply chains with supply uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.07.012>
- Nijssen, M. et Pauwe, J. (2012). HRM in turbulent times: how to achieve organizational agility? *The International Journal of Human Resource Management*, 23(16), 3315-3335. <https://doi.org/10.1080/09585192.2012.689160>
- Nizami, A.-S., Korres, N. E. et Murphy, J. D. (2009). Review of the Integrated Process for the Production of Grass Biomethane. *Environmental Science & Technology*, 43(22), 8496-8508. <https://doi.org/10.1021/es901533j>
- Noyes, D. et Peres, F. (2007). Analyse des systèmes - Sûreté de fonctionnement. Dans *Techniques de l'Ingénieur* (p. 29). <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/genie-industriel-th6/methodes-de-production-42521210/analyse-des-systemes-ag3520/>
- Oliva, R. et Kallenberg, R. (2003). Managing the transition from product to services. *International Journal of Service Industry Management*, 160-172.
- Pan, S., Ballot, E., Huang, G. Q. et Montreuil, B. (2017). Physical Internet and interconnected logistics services: research and applications. *International Journal of Production Research*, 55(9), 2603-2609. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1302620>
- Panwalkar, S. S. et Iskander, W. (1977). A survey of scheduling rules. *Operations research*, 25(1), 45-61.
- Penrose, E. (1959). *The Theory of the Growth of the Firm* (Revised edition). Oxford University Press.
- Pessot, E., Zangiacomì, A., Berkers, F., Hidalgo-Carvajal, D., Weerdmeester, R. et Fornasiero, R. (2019). *Investigating Supply Chains Models and Enabling Technologies Towards Collaborative Networks*. Luis M. Camarinha-Matos, H. Afsarmanesh et D. Antonelli (dir.), Cham (p. 335-343). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-28464-0\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-28464-0_29)
- Pinedo, M. L. (2016). *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Springer.
- Poux, M., Cagnet, P. et Gourdon, C. (2015). *Génie des procédés durables: du concept à la concrétisation industrielle*. Dunod.
- Pradhan, P., Mahajani, S. M. et Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, 181, 215-232. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021>
- Prinsloo, T. et Van Deventer, J. P. (2017). *Using the Gartner Hype Cycle to Evaluate the Adoption of Emerging Technology Trends in Higher Education – 2013 to 2016*. T.-C. Huang, R. Lau, Y.-M. Huang, M. Spaniol et C.-H. Yuen (dir.), Cham (p. 49-57). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71084-6\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71084-6_7)
- Qian, F., Zhong, W. et Du, W. (2017). Fundamental Theories and Key Technologies for Smart and Optimal Manufacturing in the Process Industry. *Engineering*, 3(2), 154-160. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.02.011>
- Quaglia, A., Sarup, B., Sin, G. et Gani, R. (2012). Integrated business and engineering framework for synthesis and design of enterprise-wide processing networks. *Computers & Chemical Engineering*, 38, 213-223. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.12.011>
- Rajsiri, V., Lorré, J.-P., Bénaben, F. et Pingaud, H. (2008). *Collaborative Process Definition Using An Ontology-Based Approach*. Luis M. Camarinha-Matos et W. Picard (dir.), (p. 205-212).
- Rajsiri, V., Lorré, J.-P., Bénaben, F. et Pingaud, H. (2010). Knowledge-based system for collaborative process specification. *Computers in Industry*, 61(2), 161-175. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2009.10.012>
- Ranade, V. V., Sharma, M. K. et Kulkarni, A. A. (2015). CRE for MAGIC (modular, agile, intensified & continuous) processes. *Chemical Engineering Journal*, 278, 454-468. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.12.050>
- Raychaudhuri, A. et Ghosh, S. K. (2016). Biomass Supply Chain in Asian and European Countries. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 914-924. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.062>

- Reitze, A., Jürgensmeyer, N., Lier, S., Kohnke, M., Riese, J. et Grünewald, M. (2018). Roadmap for a Smart Factory: A Modular, Intelligent Concept for the Production of Specialty Chemicals. *Angewandte Chemie International Edition*, 57(16), 4242-4247. <https://doi.org/10.1002/anie.201711571>
- République Française. Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement. , 2009-967 (2009).
- République Française. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. , 2015-992 (2015). /loi-transition-energetique-croissance-verte
- République Française. (2017). *Une stratégie bioéconomie pour la France - Enjeux et vision*.
- Rezaei, M. R., Darzi, M. R. K. et Valilai, O. F. (2019). A Multi-Agent Framework for Virtual Production System considering Global Manufacturing Paradigm. *Proceedings of 2019 15th Iran International Industrial Engineering Conference (iiiiec)* (p. 253-259; édité par M. ShakhshiNiaei). leee.
- Ridwandono, D. et Subriadi, A. P. (2019). IT and Organizational Agility: A Critical Literature Review. *Procedia Computer Science*, 161, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.110>
- Rosenthal, S. R. (1984). Progress toward the "factory of the future". *Journal of Operations Management*, 4(3), 203-229. [https://doi.org/10.1016/0272-6963\(84\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0272-6963(84)90012-3)
- Ross, D. T. (1977). Structured Analysis (SA): A Language for Communicating Ideas. *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-3(1), 16-34. <https://doi.org/10.1109/TSE.1977.229900>
- Ross, D. T. et Schoman, K. E. (1977). Structured Analysis for Requirements Definition. *IEEE Transactions on Software Engineering*, SE-3(1), 6-15. <https://doi.org/10.1109/TSE.1977.229899>
- Roth, A., Gerbaud, V., Boix, M. et Montastruc, L. (2017). Holistic framework for land settlement development project sustainability assessment: Comparison of El Hierro Island hydro wind project and Sivens dam project. *Computers & Chemical Engineering*, 100, 153-176. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.02.002>
- Rowley, J. (2007). The wisdom hierarchy: representations of the DIKW hierarchy. *Journal of Information Science*. <https://doi.org/10.1177/0165551506070706>
- Rumpl, W. E., Auinger, F., Dutzler, C. et Zoitl, A. (2002). Platforms for Scalable Flexible Automation Considering the Concepts of IEC 61499. Dans V. Mařík, L. M. Camarinha-Matos et H. Afsarmanesh (dir.), *Knowledge and Technology Integration in Production and Services: Balancing Knowledge and Technology in Product and Service Life Cycle* (p. 237-246). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-35613-6\\_26](https://doi.org/10.1007/978-0-387-35613-6_26)
- Rynk, R., Van de Kamp, M., Willson, G. B., Singley, M. E., Richard, T. L., Kolega, J. J., Gouin, F. R., Laliberty, L. Jr., Kay, D., Murphy, D. W., Hoitink, H. A. J. et Brinton, W. F. (1992). *On-Farm Composting Handbook*.
- Saib, S., Benmoussa, R. et Benghoud, K. (2005). Modeling of mediation system for enterprise systems collaboration through MDA and SOA approaches. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 54(3), 14.
- Samdantsoodol, A., Cang, S., Yu, H., Eardley, A. et Buyantsogt, A. (2017). Predicting the relationships between virtual enterprises and agility in supply chains. *Expert Systems with Applications*, 84, 58-73. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.037>
- Santos Bernardes, E. et Hanna, M. D. (2009). A theoretical review of flexibility, agility and responsiveness in the operations management literature: Toward a conceptual definition of customer responsiveness. *International Journal of Operations & Production Management*, 29(1), 30-53. <https://doi.org/10.1108/01443570910925352>
- Sardin, M. (2017). L'usine du futur : vers un génie des procédés durables. Dans A. Euzen, L. Eymard et F. Gaill (dir.), *Le développement durable à découvert* (p. 306-307). CNRS Éditions. <http://books.openedition.org/editions-cnrs/10863>
- Schmidt, T. S., Guaragni, F. et Paetzold, K. (2016, juin). *Demerging agility, leanness, flexibility, reconfigurability and changeability: Towards a clear distinction*. 2016 International Conference on Engineering, Technology and Innovation/IEEE International Technology Management Conference (ICE/ITMC), Trondheim, Norway (p. 1-11). <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC39735.2016.9026110>

- Schuh, G., Baessler, E. et Meier, J. (2007). An evaluation method for the identification of flexible production technologies for Mass Customisation in the automotive industry. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 10(4), 347-359. <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2007.012154>
- Schuh, G., Lenders, M., Nussbaum, C. et Kupke, D. (2009). Design for Changeability. Dans *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems* (p. 251-266). Springer.
- Schuh, Günther, Bergweiler, G., Fiedler, F., Bickendorf, P. et Colag, C. (2019). A Review on Flexible Forming of Sheet Metal Parts. 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM) (p. 1221-1225). <https://doi.org/10.1109/IEEM44572.2019.8978879>
- Seidewitz, E. (2003). What models mean. *IEEE Software*, 20(5), 26-32. <https://doi.org/10.1109/MS.2003.1231147>
- Semar-Bitah, K. et Boukhalfa, K. (2019). Towards the Meta-Modeling of Complex Inter-Organisationnel Collaborative Processes. *International Journal of E-Business Research (IJEER)*, 15(3), 16-34.
- SFGP. (2017). *Le Génie des Procédés en France - Quelles réponses du Génie des Procédés pour un renouveau industriel ? - Livre Blanc*. Société Française de Génie des Procédés (SFGP).
- SFGP. (2019). *L'usine du Futur pour les industries de procédés*. Société Française de Génie des Procédés (SFGP).
- Sharma, N., Sahay, B. S., Shankar, R. et Sarma, P. R. S. (2017). Supply chain agility: review, classification and synthesis. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 20(6), 532-559. <https://doi.org/10.1080/13675567.2017.1335296>
- Shi, H. et You, F. (2016). A computational framework and solution algorithms for two-stage adaptive robust scheduling of batch manufacturing processes under uncertainty. *Aiche Journal*, 62(3), 687-703. <https://doi.org/10.1002/aic.15067>
- Sindhwani, R. et Malhotra, V. (2015). *Lean and Agile Manufacturing System Barriers*. International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2015) (p. 3).
- Sindhwani, R. et Malhotra, V. (2016). Modelling the attributes affecting design and implementation of agile manufacturing system. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 6(2), 216. <https://doi.org/10.1504/IJPMB.2016.075606>
- Sindhwani, R., Singh, P. L., Kaushik, V., Sharma, S. et Phanden, R. Kr. (2020). *Analysis of Barriers to Lean-Green Manufacturing System (LGMS): A Multi-criteria Decision-Making Approach*. G. Krolczyk, C. Prakash, S. Singh et J. P. Davim (dir.), Singapore (p. 181-188). [https://doi.org/10.1007/978-981-15-4565-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-15-4565-8_16)
- Soepardi, A., Pratikto, P., Santoso, P. B. et Tama, I. P. (2018). An updated literature review of agile manufacturing: classification and trends. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 29(1), 95-126. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2018.091436>
- Soley, R. (2000). Model Driven Architecture. *OMG White Paper*, 308(308), 5.
- Stahel, W. (1994). The utilization-focused service economy: Resource efficiency and product-life extension. Dans *The Greening of Industrial Ecosystems*. National Academies Press.
- Stahel, W. R. (1997). The functional economy: cultural and organizational change. *The Industrial green game: implications for environmental design and management*, 91-100.
- Stankiewicz, A. I. et Moulijn, J. A. (2000). Process Intensification: Transforming Chemical Engineering. *Chemical Engineering Progress*, 96(1), 22-34.
- Stec, L. Z., Bell, P. K., Borissova, A., Fairweather, M., Goltz, G. E., McKay, A. et Wang, X. Z. (2003). Reconfigurable batch processes: Innovative design of the engineering side of chemical supply chains. Dans *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 15, p. 346-351). Elsevier.
- Steimel, J. et Engell, S. (2015). Conceptual design and optimization of chemical processes under uncertainty by two-stage programming. *Computers & Chemical Engineering*, 81, 200-217. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.05.016>
- Stelte, W., Sanadi, A. R., Shang, L., Holm, J. K., Ahrenfeldt, J. et Henriksen, U. B. (2012). Recent developments in biomass pelletization - A review. *BioResources*, 7(3), 4451-4490.

- Stephanopoulos, G. et Reklaitis, G. V. (2011). Process systems engineering: From Solvay to modern bio- and nanotechnology.: A history of development, successes and prospects for the future. *Chemical Engineering Science*, 66(19), 4272-4306. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.049>
- Stewart, G. (1997). Supply-chain operations reference model (SCOR): the first cross-industry framework for integrated supply-chain management. *Logistics Information Management*, 10(2), 62-67. <https://doi.org/10.1108/09576059710815716>
- Studer, R., Benjamins, V. R. et Fensel, D. (1998). Knowledge engineering: Principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*, 25(1), 161-197. [https://doi.org/10.1016/S0169-023X\(97\)00056-6](https://doi.org/10.1016/S0169-023X(97)00056-6)
- Sun, Q., Li, H., Yan, J., Liu, L., Yu, Z. et Yu, X. (2015). Selection of appropriate biogas upgrading technology- a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 521-532. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.029>
- Sung, S. W., Lee, I.-B., Choi, J. Y. et Lee, J. (1998). Adaptive control for pH systems. *Chemical Engineering Science*, 53(10), 1941-1953. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00050-5)
- Surendra, K. C., Sawatdeenarunat, C., Shrestha, S., Sung, S. et Khanal, S. K. (2015). Anaerobic Digestion-Based Biorefinery for Bioenergy and Biobased Products. *Industrial Biotechnology*, 11(2), 103-112. <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0001>
- Swafford, P. M., Ghosh, S. et Murthy, N. (2006). The antecedents of supply chain agility of a firm: Scale development and model testing. *Journal of Operations Management*, 24(2), 170-188. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2005.05.002>
- Swafford, P. M., Ghosh, S. et Murthy, N. (2008). Achieving supply chain agility through IT integration and flexibility. *International Journal of Production Economics*, 116(2), 288-297. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.09.002>
- Szejka, A. L., Canciglieri, O. J., Panetto, H., Aubry, A. et Rocha Loures, E. (2017, juillet). *A semantic reconciliation view to support the interoperable information relationships in product design and manufacturing*. Toulouse, France (vol. 50, p. 15896-15903). <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2357>
- Tallon, P. P., Queiroz, M., Coltman, T. et Sharma, R. (2019). Information technology and the search for organizational agility: A systematic review with future research possibilities. *The Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), 218-237. <https://doi.org/10.1016/j.jsis.2018.12.002>
- Tan, D., Zhang, L. et Ai, Q. (2019). An embedded self-adapting network service framework for networked manufacturing system. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(2), 539-556. <https://doi.org/10.1007/s10845-016-1265-3>
- Tangkawarow, I. R. H. T. et Waworuntu, J. (2016). *A Comparative of business process modelling techniques* (vol. 128, p. 012010). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/128/1/012010>
- The Agile Alliance. (2001). Manifesto for Agile Software Development. <http://www.agilemanifesto.org>
- Treiblmaier, H., Mirkovski, K., Lowry, P. B. et Zacharia, Z. G. (2020). The physical internet as a new supply chain paradigm: a systematic literature review and a comprehensive framework. *The International Journal of Logistics Management*, 31(2), 239-287. <https://doi.org/10.1108/IJLM-11-2018-0284>
- Trokanas, N., Bussemaker, M., Velliou, E., Tokos, H. et Cecelja, F. (2015). BiOnto: An Ontology for Biomass and Biorefining Technologies. Dans *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 37, p. 959-964). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63577-8.50005-X>
- Truong-Meyer, X.-M. (2009). Modélisation en génie des procédés. Dans *Techniques de l'Ingénieur* (p. 21).
- Trzcielinski, S. (2020). *The Influence of Human Capital Management on Implementation of Industry 4.0*. B. Mrugalska, S. Trzcielinski, W. Karwowski, M. Di Nicolantonio et E. Rossi (dir.), Cham (p. 26-32). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-51981-0\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-51981-0_3)
- Tukker, A. (2004). Eight types of product-service system: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. *Business Strategy and the Environment*, 13(4), 246-260. <https://doi.org/10.1002/bse.414>

- Uhlemann, J., Costa, R. et Charpentier, J.-C. (2019). Product Design and Engineering in Chemical Engineering: Past, Present State, and Future. *Chemical Engineering & Technology*, 42(11), 2258-2274. <https://doi.org/10.1002/ceat.201900236>
- Ullah Khan, I., Hafiz Dzarfan Othman, M., Hashim, H., Matsuura, T., Ismail, A. F., Rezaei-DashtArzhandi, M. et Wan Azelee, I. (2017). Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilisation and storage. *Energy Conversion and Management*, 150, 277-294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.035>
- Vaidya, S., Ambad, P. et Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Vallon, R., da Silva Estácio, B. J., Prikładnicki, R. et Grechenig, T. (2018). Systematic literature review on agile practices in global software development. *Information and Software Technology*, 96, 161-180. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.12.004>
- van der Aalst, W., Adriansyah, A., de Medeiros, A. K. A., Arcieri, F., Baier, T., Blickle, T., Bose, J. C., van den Brand, P., Brandtjen, R., Buijs, J., Burattin, A., Carmona, J., Castellanos, M., Claes, J., Cook, J., Costantini, N., Curbera, F., Damiani, E., de Leoni, M., ... Wynn, M. (2012). *Process Mining Manifesto*. F. Daniel, K. Barkaoui et S. Dustdar (dir.), Berlin, Heidelberg (p. 169-194). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-28108-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28108-2_19)
- Vandermerwe, S. et Rada, J. (1988). Servitization of business: Adding value by adding services. *European Management Journal*, 6(4), 314-324. [https://doi.org/10.1016/0263-2373\(88\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0263-2373(88)90033-3)
- Venkatasubramanian, V. (2019). The promise of artificial intelligence in chemical engineering: Is it here, finally? *AIChE Journal*, 65(2), 466-478. <https://doi.org/10.1002/aic.16489>
- VersionOne. (2010). State of agile survey - « Tha state of Agile development » - 5th annual.
- Vezzoli, C., Ceschin, F., Diehl, J. C. et Kohtala, C. (2015). New design challenges to widely implement 'Sustainable Product–Service Systems'. *Journal of Cleaner Production*, 97, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.061>
- Vinodh, S., Devadasan, S. R., Reddy, B. V. et Ravichand, K. (2010). Agility index measurement using multi-grade fuzzy approach integrated in a 20 criteria agile model. *International Journal of Production Research*, 48(23), 7159-7176. <https://doi.org/10.1080/00207540903354419>
- Vinodh, S., Sundararaj, G. et Devadasan, S. R. (2009). Total agile design system model via literature exploration. *Industrial Management & Data Systems*, 109(4), 570-588. <https://doi.org/10.1108/02635570910948678>
- von Delft, S. et Zhao, Y. (2020). Business models in process industries: Emerging trends and future research. *Technovation*, 105, 102195. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2020.102195>
- Vujasinovic, M., Barkmeyer, E., Ivezic, N. et Marjanovic, Z. (2010). Interoperable supply-chain applications: message metamodel-based semantic reconciliation of b2b messages. *International Journal of Cooperative Information Systems*, 19(01n02), 31-69. <https://doi.org/10.1142/S0218843010002103>
- Wadhwa, P. S. et Rao, M. K. S. (2003). Flexibility and Agility For Enterprise Synchronization: Knowledge and Innovation Management Towards. *Studies in Informatics and Control*, 12(2), 18.
- Walker, W. H., Lewis, W. K. et McAdams, W. H. (1923). *Principles of Chemical Engineering* (First Edition). McGraw-Hill Publishing Co. <https://doi.org/10.1021/j150387a017>
- Wang, H., Zhou, T., Tian, L., Qian, Y. et Li, J. (2014). Creating hospital-specific customized clinical pathways by applying semantic reasoning to clinical data. *Journal of Biomedical Informatics*, 52, 354-363. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2014.07.017>
- Weber, R. S. et Snowden-Swan, L. J. (2019). The economics of numbering up a chemical process enterprise. *Journal of Advanced Manufacturing and Processing*, 1(1-2), e10011. <https://doi.org/10.1002/amp2.10011>
- Wendler, R. (2013). *The Structure of Agility from Different Perspectives*. Federated Conference on Computer Science and Information Systems (p. 1165-1172).
- Wiederhold, G. (1992). Mediators in the architecture of future information systems. *Computer*, 25(3), 38-49. <https://doi.org/10.1109/2.121508>

- Wiendahl, H.-P. et Hernández, R. (2006). The Transformable Factory – Strategies, Methods and Examples. Dans A. I. Dashchenko (dir.), *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories* (p. 383-393). Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-29397-3\\_20](https://doi.org/10.1007/3-540-29397-3_20)
- Wisniewski, P., Kluza, K. et Ligeza, A. (2018). *Towards Automated Process Modeling Based on BPMN Diagram Composition*. International Conference on Business Process Management (p. 507-513).
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C. et Bogaardt, M.-J. (2017). Big Data in Smart Farming – A review. *Agricultural Systems*, 153, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>
- Womack, J. P. et Jones, D. T. (1997). Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), 1148-1148. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600967>
- Wu, N. et Su, P. (2005). Selection of partners in virtual enterprise paradigm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(2), 119-131. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2004.05.006>
- Wu, W., Henao, C. A. et Maravelias, C. T. (2016). A Superstructure Representation, Generation, and Modeling Framework for Chemical Process Synthesis. *Aiche Journal*, 62(9), 3199-3214. <https://doi.org/10.1002/aic.15300>
- Xiao, J., Liu, B., Huang, Y. et Cheng, Z. (2014). An adaptive quantum swarm evolutionary algorithm for partner selection in virtual enterprise. *International Journal of Production Research*, 52(6), 1607-1621. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.841329>
- Yang, C., Liang, P. et Avgeriou, P. (2016). A systematic mapping study on the combination of software architecture and agile development. *Journal of Systems and Software*, 111, 157-184. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.09.028>
- Younis, M., Alnouri, S. Y., Tarboush, B. J. A. et Ahmad, M. N. (2018). Renewable biofuel production from biomass: a review for biomass pelletization, characterization, and thermal conversion techniques. *International Journal of Green Energy*, 15(13), 837-863. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1529581>
- Yuan, Z., Qin, W. et Zhao, J. (2017). Smart Manufacturing for the Oil Refining and Petrochemical Industry. *Engineering*, 3(2), 179-182. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.02.012>
- Yusuf, Y., Gunasekaran, A., Musa, A., Dauda, M., El-Berishy, N. et Cang, S. (2014). A relational study of supply chain agility, competitiveness and business performance in the oil and gas industry. *International Journal of Production Economics*, 147, 531-543. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.10.009>
- Yusuf, Y. Y., Sarhadi, M. et Gunasekaran, A. (1999). Agile manufacturing: The drivers, concepts and attributes. *International Journal of Production Economics*, 62(1-2), 33-43. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00219-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00219-9)
- Zendehboudi, S., Rezaei, N. et Lohi, A. (2018). Applications of hybrid models in chemical, petroleum, and energy systems: A systematic review. *Applied Energy*, 228, 2539-2566. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.051>
- Zhang, Z. et Sharifi, H. (2000). A methodology for achieving agility in manufacturing organisations. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(4), 496-513. <https://doi.org/10.1108/01443570010314818>
- Zhou, J., Bi, G., Liu, H., Fang, Y. et Hua, Z. (2018). Understanding employee competence, operational IS alignment, and organizational agility – An ambidexterity perspective. *Information & Management*, 55(6), 695-708. <https://doi.org/10.1016/j.im.2018.02.002>
- Zoitl, A., Kainz, G. et Keddis, N. (2013). *Production Plan-Driven Flexible Assembly Automation Architecture*. V. Mařík, J. L. M. Lastra et P. Skobelev (dir.), Berlin, Heidelberg (p. 49-58). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-40090-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40090-2_5)

# Annexes

---

## Annexe 1 : Technologies et concepts les plus fréquemment cités dans l'Industrie 4.0 (Vaidya et al., 2018)

Intitulé	Description
Robot autonome	Robots accomplissant des tâches complexes en augmentant leur utilité, leur autonomie, leur flexibilité et leur capacité de coopération
Fabrication additive	Ensemble de technologies pour la création de prototypes et de composants unitaires
Réalité augmentée	Couplage entre le monde réel et les éléments numériques en temps réel, offrant à l'utilisateur des possibilités d'interaction en temps réel et reposant sur un environnement 3D
Simulation	Détermination de la meilleure conception possible de systèmes de production et de distribution avec une tendance à l'extension de la simulation 3D
Intégration horizontale et verticale des systèmes	L'intégration horizontale : mise en réseau de machines individuelles, d'équipements ou d'unités de production L'intégration verticale : contrôle de différentes parties de la chaîne d'approvisionnement
Internet des Objets Industriels (IIoT)	Réseau de dispositifs reliés par les Technologies de l'Information et de la Communication pour des systèmes capables de surveiller, de collecter des données, d'échanger, d'analyser et de fournir de nouvelles informations
Environnement Cloud	Mode de stockage et d'accès à des données et des programmes sur Internet en temps réel
Cybersécurité	Technologies, processus et moyens de contrôle conçus pour protéger les systèmes, les réseaux et les données contre les cyberattaques
Big Data et analyse	Concept disposant d'outils technologiques consistant à examiner des ensembles de données variées afin de d'établir des modèles et des corrélations utiles aux organisations. Ce concept caractérise les propriétés des données selon les 5 V : le Volume, la Variété, la Vitesse, la Valeur et la Véracité (Demchenko et al., 2014)

C'est sans compter les cinq tendances qui se démarquent.

Intitulé	Description
Architectures composites	Face aux changements rapides et à la décentralisation, les organisations doivent passer à des architectures plus agiles et plus réactives. Une architecture composite est constituée de modules commerciaux reposant sur un environnement de données flexibles.
Confiance algorithmique	Les modèles de confiance algorithmiques garantissent la confidentialité et la sécurité des données, la provenance des biens et l'identité des personnes et des choses.
Nouveaux matériaux	Il s'agit de l'évolution vers de nouveaux matériaux avancés conçus pour supporter des technologies miniaturisées et plus rapides.
L'Intelligence Artificielle (IA) formative	L'IA formative est un type d'IA capable d'évoluer dynamiquement pour répondre à une situation spécifique.
« Moi » numérique	Les modèles numériques représentent les humains dans le monde réel et virtuel : passeport de santé, jumeaux numériques, etc.

## Annexe 2 : Concept d'agilité pour la production manufacturière

Le tableau ci-dessous comprend les définitions de l'agilité provenant de la littérature au sujet de la production manufacturière. Les aspects clés de chaque définition ont été mis en évidence.

Auteur, Date	Définition	Aspects clés
(Kidd, 1994)	"The <i>ability</i> to thrive and prosper in a competitive environment of continuous and unanticipated change and to <i>respond quickly</i> to <i>rapidly changing markets</i> driven by the customer-based valuing of products."	Croissance Rapidité Changements
(Goldmann et al., 1995)	"Agility is dynamic, context specific, aggressively <i>change embracing</i> , and growth oriented. It is about <i>succeeding and winning profits, market share and customers</i> in the very center of competitive storms that many companies now fear."	
(Fliedner et Vokurka, 1997)	"The <i>ability</i> to produce a broad range of low cost, high-quality products with <i>short lead times</i> in varying lot sizes and built to individual customer specifications."	Délais de fabrication courts Rapidité
(Gunasekaran, 1999)	"The <i>capability</i> of an enterprise to <i>survive and prosper</i> in a competitive environment of <i>continuous and unpredictable change</i> by <i>reacting quickly and effectively</i> to changing markets, driven by customer-designed products and services."	Croissance Réaction Rapidité Efficacité
(Yusuf et al., 1999)	"The successful exploration of competitive bases ( <i>speed, flexibility, innovation proactivity, quality and profitability</i> ) through the <i>integration of reconfigurable resources</i> and <i>best practices</i> in a knowledge-rich environment to provide customer- driven products and services in a <i>fast-changing market environment</i> ."	Rapidité Flexibilité Innovation Proactivité Qualité Croissance Bonnes pratiques
(Zhang et Sharifi, 2000)	" <i>Understanding and responding to changes</i> , and taking advantage of changes through strategic utilization of <i>managerial and manufacturing methods and tools</i> ."	Méthodes de gestion
(Jin-Hai et al., 2003)	"Real Agile Manufacturing (RAM) is the <i>strategic process</i> of <i>responding</i> to the competitive environment of continuous and unpredictable change by <i>reacting quickly and effectively</i> to changing markets."	Stratégie Rapidité Efficacité
(Yusuf et al., 2014)	"A system with internal resource competencies to answer to customer dynamic demands with <i>speed and flexibility</i> "	Rapidité Flexibilité
(Sindhvani et Malhotra, 2016)	"A paradigm that enables an organisation to <i>quickly react</i> in accordance with the <i>dynamic demands</i> of the customers by making <i>use of appropriate technologies and management models</i> "	Rapidité Changements Technologie Modèles de gestion

### Annexe 3 : Concept d'agilité pour les chaînes logistiques

Le tableau ci-dessous comprend les définitions de l'agilité provenant de la littérature au sujet la chaîne logistique. Les aspects clés de chaque définition ont été mis en évidence.

Auteur, Date	Définition	Aspects clés
(H. L. Lee, 2002)	"Supply chains that utilize <i>strategies</i> aimed at being <i>responsive</i> and <i>flexible</i> to customer needs while the risks of supply <i>shortages or disruptions</i> are hedged by pooling inventory or other capacity resources."	Stratégie Réactivité Flexibilité
(Ismail et Sharifi, 2006)	"The <i>capability</i> of the supply chain and <i>its members</i> as a whole to <i>rapidly</i> align the <i>network and its operations</i> to <i>dynamic and turbulent customer requirements</i> ."	Capacité de production Partenaires Rapidité Réseaux
(Swafford et al., 2006)	"The supply chain's <i>capability</i> to <i>adapt</i> or <i>respond</i> in a speedy manner to a changing marketplace environment."	Capacité de production Rapidité Adaptation
(Swafford et al., 2008)	"Supply Chain Agility represents the <i>speed</i> of the aggregate supply chain to <i>adapt</i> in a more customer-responsive manner."	Rapidité Adaptation
(Gligor et Holcomb, 2012)	"Supply chain's <i>ability</i> to <i>quickly adjust</i> its tactics and operations. This ability can manifest itself <i>proactively</i> or <i>reactively</i> ."	Capacité de production Rapidité Ajustement Proactivité Réactivité
(Fayezi et al., 2017)	"A strategic <i>ability</i> that assists <i>organizations rapidly</i> to <i>sense and respond</i> to internal and external <i>uncertainties</i> via effective integration of supply chain relationships."	Capacité de production Rapidité Détection
(Dubey et al., 2018)	"Supply chain agility is the <i>property</i> of a supply chain that enables it to <i>sense short-term</i> , temporary changes in supply chain and <i>market environment</i> , and <i>flexibly</i> and <i>rapidly respond</i> to these changes."	Détection Rapidité Contexte Flexibilité
(Marche et al., 2019)	"The agility of a supply chain corresponds to its ability to <i>change configuration</i> according to the <i>strategic, technological, organizational or human</i> plans of the innovative companies that make it up."	Adaptation Stratégie Technologie

## Annexe 4 : Tableau comparatif des dimensions de notre vision de l'agilité avec les méthodes et les outils des termes proches de l'agilité dans le Génie des Procédés

Les publications ont été à nouveau filtrées à la lecture du résumé, puis à la lecture de l'article. Les plus pertinentes pour ces travaux et notamment celles présentant un cadre méthodologique, des méthodes et/ou des outils permettant d'apporter de l'agilité à un système ont été analysées dans le tableau ci-dessous en fonction des quatre dimensions de l'agilité. Ce tableau est détaillé et commenté dans la prochaine section.

	Science Direct (SD)	Web of Science (WOS)
Paramètres de recherche	[[agil OR agility) +(adaptive OR adaptability) + (changeable OR changeability) + (flexible OR flexibility) + (holon OR holonic) + (leagile) + (lean OR leanness) + (modular OR modularity) + (reconfigurable OR reconfigurability) + (resilient OR resilience) + (responsive OR responsiveness) + (transformable OR transformability)] AND (process OR system) AND engineering AND (framework OR method OR procedure OR guideline)	[agil * + adapt* + changea* + flexib* + holon* + lean* + leagi*+ modula* + reconfigurabl* + resilien* + responsiv* + transformab*] AND (process OR system) AND engineering AND (framework OR method OR procedure OR guideline)
Emplacement des paramètres	Titre et/ou abstract et/ou mots-clés	
Mots à retrouver dans le corps des réponses	Chemical + Engineering + Process	
Période	1991-2020	

Les bases documentaires Web of Science et Science Direct ont été interrogées avec les paramètres suivants dans le tableau ci-dessous. Par la suite, les articles ont été filtrés selon les journaux en rapport avec le Génie des Procédés : Computers and Chemical Engineering, Chemical Engineering Journal, Computer Aided Chemical Engineering, Chemical Engineering Research and Design, Chemical Engineering Science, Journal of Cleaner Production et AIChE.

Les concepts sont identifiés par les acronymes : ADAP : Adaptabilité – AGIL : Agilité - CHAN : Changeabilité – FLEX : Flexibilité – HOLO : Holonisme – LEAG : Leagilité : LEAN : Lean – MODU : Modularité – RECO : Reconfigurabilité – REAC : Réactivité – RESI : Résilience – TRAN : Transformabilité.

Mot clé	Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Périmètre d'application	Dimensions de l'agilité			
					Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
ADAP	(Steimel et Engell, 2015)	Gestion des incertitudes lors du développement de superstructures <i>Modélisation Optimisation</i>	Flow Sheet Superstructure Optimization tool (FSSO)	Procédé		x	x	

Annexe 4 : Tableau comparatif des dimensions de notre vision de l'agilité avec les méthodes et les outils des termes proches de l'agilité dans le Génie des Procédés

Mot clé	Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Périmètre d'application	Dimensions de l'agilité			
					Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
ADAP	(Sung et al., 1998)	Adaptation aux non linéarités et aux caractéristiques temporelles <i>Conception</i>	Méthode des Moindres Carrés	Équipement		x	x	
ADAP LEAN	(Leong et al., 2019)	Accompagnement de la conversion d'un procédé traditionnel vers le « Lean et Green » <i>Modélisation</i>	Analytic Hierarchy Process (AHP)	Procédé		x	x	
ADAP FLEX	(Chen et al., 2018)	Garantir la flexibilité et la stabilité des étapes du procédé Optimisation	Théorie de la singularité (Analyse de la flexibilité intégrant la stabilité)	Opération unitaire		x	x	
ADAP	(Bhadriraju et al., 2019)	S'adapter à l'évolution de la dynamique de la concentration et de la température <i>Modélisation</i>	Identification des fonctions à partir du logiciel Sparse Identification of Nonlinear Dynamics (SINDy) Actualisation des coefficients du modèle en utilisant la méthode des Moindres Carrés	Équipement		x	x	
ADAP	(Shi et You, 2016)	Gestion de la planification de la production en production batch <i>Modélisation Optimisation</i>	Adaptive Robust Optimization (ARO)	Procédé		x		
ADAP FLEX	(Ng et Martinez Hernandez, 2016)	Réalisation de systèmes poly générationnels dans une approche développement durable <i>Conception Modélisation</i>	Définition du problème Modélisation mathématique Analyse des limites extérieures Analyse des limites intérieures	Procédé		x	x	
AGIL	(Burgess et al., 2004)	Développement de procédés et d'usines agiles : Diminution de la durée de développement du procédé, de fabrication et des investissements dans une usine agile	Business Gate Framework (BGF) Tool for Opportunity Focus, Improvement and Evaluation (TOFIE)	Usine		x		

Annexe 4 : Tableau comparatif des dimensions de notre vision de l'agilité avec les méthodes et les outils des termes proches de l'agilité dans le Génie des Procédés

Mot clé	Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Périmètre d'application	Dimensions de l'agilité			
					Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
		<i>Conception</i>						
AGIL TRAN MODU	(Ranade et al., 2015)	Réalisation d'équipements modulaires <i>Conception</i>	Méthodologie MAGIC (Modular, AGile, Intensified and Continuous)	Équipement		x	x	x
FLEX	(Quaglia et al., 2012)	Cadre d'aide à la décision pour la gestion des usines et le développement de nouveaux procédés <i>Optimisation</i>	Définition du problème Collecte des données et définition de la superstructure Sélection, développement et validation des modèles Modèle Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) Optimisation de l'alternative sélectionnée	Usine	x	x	x	
FLEX	(Di Pretoro et al., 2019)	Méthode d'analyse pour évaluer le niveau de flexibilité d'un équipement <i>Optimisation</i>	Analyse de la flexibilité	Équipement		x	x	
FLEX	(Ajah et al., 2005)	Mise en œuvre de la flexibilité dans des infrastructures contenant les procédés <i>Conception</i> <i>Modélisation</i> <i>Optimisation</i>	Définition des exigences Modélisation Conception Mesure des performances	Usine		x	x	
FLEX	(Heitmann et al., 2017)	Planification et investissement de la production selon la fluctuation des marchés <i>Conception</i>	Modélisation du marché instable Création de centrales de références et de centrales flexibles Planification de la production Évaluation économique et du risque Évaluation de l'investissement	Procédé	x	x	x	

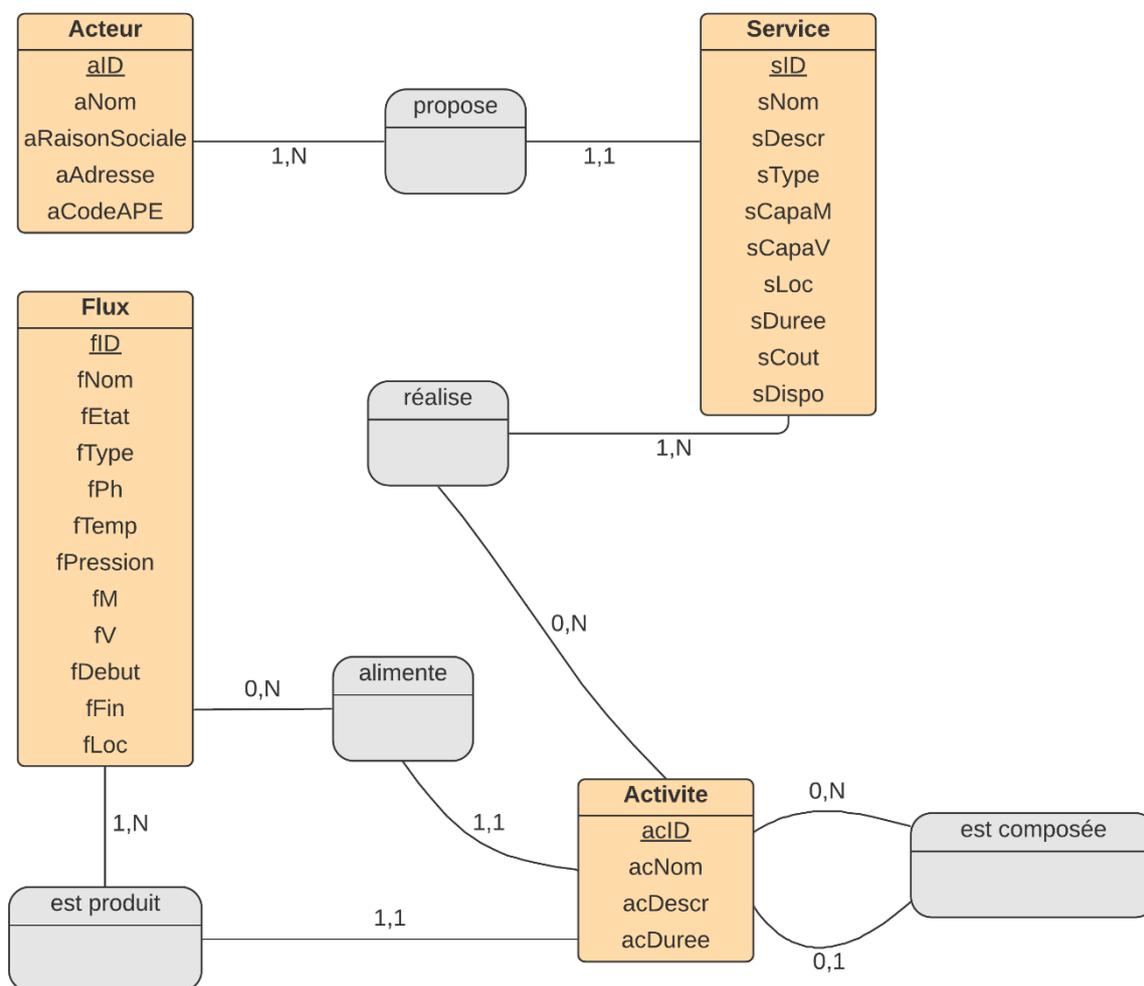
Annexe 4 : Tableau comparatif des dimensions de notre vision de l'agilité avec les méthodes et les outils des termes proches de l'agilité dans le Génie des Procédés

Mot clé	Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Périmètre d'application	Dimensions de l'agilité			
					Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
FLEX	(Anantpinij watna et al., 2016)	Conception et analyse de systèmes de réaction catalytique selon les conditions de réaction, de pression, de température et selon différents solvants <i>Modélisation</i>	Modèles thermodynamiques prédictifs et corrélatifs	Opération unitaire		x		
LEAN	(Bettermann et al., 2019)	Amélioration de la rentabilité de la réalisation d'équipements pour un procédé <i>Conception</i>	Modélisation Computer Aided Design (CAD), la simulation Computational Fluid DynamicsCFD et l'impression 3D	Equipement		x	x	
MODU	(Eilermann et al., 2017)	Création d'une base de données de modules pour un équipement <i>Conception</i>	Fiche de données processus Analyse des clusters Conception de l'équipement de référence Analyse de la demande Base de données de l'équipement	Opération unitaire		x	x	x
MODU	(Wu et al., 2016)	Modélisation et création de superstructures pour la synthèse de procédés <i>Modélisation Conception</i>	Approche modulaire	Procédé		x	x	x
MODU	(Lier et al., 2017)	Développement des appareils modulaires <i>Conception</i>	Mise à l'échelle innovante	Équipement				
RESI MODU	(Gerbaud et al., 2020)	Développement de procédés inspirés par la nature <i>Modélisation</i>	Thermodynamique hors équilibre Loi de la construction Concept de contrôle non linéaire	Procédé		x	x	
RESI	(Hu et al., 2015)	Gestion des accidents <i>Modélisation</i>	Modèle de propagation des fautes hiérarchiques basé sur l'Ingénierie de la Résilience	Procédé	x	x		

Annexe 4 : Tableau comparatif des dimensions de notre vision de l'agilité avec les méthodes et les outils des termes proches de l'agilité dans le Génie des Procédés

Mot clé	Auteur, Date	Objectif <i>Cadre</i>	Méthodes et/ou Outils	Périmètre d'application	Dimensions de l'agilité			
					Détection	Adaptation	Efficacité	Réactivité
RESI	(Jain et al., 2018)	Gestion des risques <i>Modélisation</i> <i>Conception</i>	Ingénierie de la Résilience	Procédé	x	x	x	
RESI	(O'Connor et al., 2019)	Gestion de la sécurité des procédés <i>Conception</i>	Triangle de la sécurité de Sam Manna : prévenir, atténuer, répondre	Procédé	x	x	x	

## Annexe 5 : Modèle entité association pour le procédé agile



## Acteur

Acronyme	Intitulé	Description	Métrique
aID	Identifiant	N° SIRET : numéro unique d'identification	
aNom	Nom de l'acteur	Nom de famille de l'acteur	
aRaisonSociale	Raison sociale	Nom de la structure gérée par l'acteur	
aAdresse	Adresse	Adresse postale de la structure de l'acteur	
aCodeAPE	Code APE	Identifiant de la branche d'activité de l'acteur	

## Activité

Acronyme	Intitulé	Description	Métrique
acID	Identifiant	Identifiant unique propre à chaque activité	
acNom	Nom	Nom de l'activité	
acDescr	Description	Description fonctionnelle de l'activité	
acDuree	Duré	Durée théorique minimale de l'activité	En jours

## Flux

Acronyme	Intitulé	Description	Métrique
fID	Identifiant	Identification unique du flux de matière	
fNom	Nom	Nom du	
fEtat	Etat	Etat du flux (solide, liquide ou gazeux)	
fType	Type	Type de matière impliquée	
fPh	pH	pH	Sans unité
fTemp	Température	Température	°C
fPression	Pression	Pression	
fM	Masse	Masse	Tonne
fV	Volume	Volume	m3
fDebut	Début de mise à disposition	Date de début de mise à disposition	bar
fFin	Fin de mise à disposition	Date de fin de mise à disposition	
fLoc	Localisation	Localisation du flux par coordonnées GPS	

## Service

Acronyme	Intitulé	Description	Métrique
sID	Identifiant	Identifiant unique propre à chaque service	
sNom	Nom	Nom du service	
sDescr	Description	Description fonctionnelle du service proposé	
sType	Type	Type de service (transformation, transport ou stockage)	
sCapaM	Capacité massique	Capacité massique prise en charge par le service	Tonne /jour
sCapaV	Capacité volumique	Capacité volumique prise en charge par le service	m3 /jour
sLoc	Localisation	Coordonnées GPS de l'emplacement où le service sera exécuté	
sDuree	Durée	Durée du service	Jour
sCout	Coût	Coût du service	€ / jour
sDispo	Disponibilité	Plages de disponibilité du service	

## Annexe 6 : Pseudo code commenté de l'algorithme de déduction

---

### Algorithme\_DéductionDesProcédés

---

#### Objectif

Déterminer le(s) procédé(s) servicisé(s)

#### Paramètres :

in, out, tabSaDispo

#### Sortie:

tabProcetes

#### Variables :

nbTotActivite, toutComplet, premiereFois, outDejaExistant, trouveIn, indLigneTabProcetes

#### Début

//Initialisation des variables

in<--matierePremiere

indLigneTabProcetes<--1

// Pour chaque ligne de tabsadispo

**Pour** i allant de 1 à nbSADispo **Faire**

**Si** in=tabsadispo[i][2] **Alors**

        // Copie des valeurs de tabSaDispo dans TabProcetes

        tabProcetes[indLigneTabProcetes][2] <--tabsadispo[i][2]

        tabProcetes[indLigneTabProcetes][3] <--tabsadispo[i][3]

        tabProcetes[indLigneTabProcetes][4] <--tabsadispo[i][4]

        // je regarde si la sortie est le produit final :

**Si** tabsadispo[i][3]=produitFinal **Alors**

            // Procédé complet, valeur 1

            tabProcetes[indLigneTabProcetes][1]<--"1"

**Sinon**

            // Procédé incomplet, valeur 0

            tabProcetes[indLigneTabProcetes][1]<--"0"

**Fin Si**

        // Incrémentation d'une nouvelle ligne

        indLigneTabProcetes = indLigneTabProcetes+1

**Fin Si**

**Fin Pour**

tailleTabProcedes<--indLigneTabProcedes

// Tableau non vide

**Si** indLigneTabProcedes=1 **Alors**

// Tableau vide

**Retourner**"STOP"

**Sinon**

// Initialisation nbTotActivite à 1

nbTotActivite<--1

// Initialisation tableau copieLigne

copieLigne[3\*nbSaDispo]<-- « »

// Initialisation variable toutComplet

toutComplet<--0

**Tant que** nbTotActivite<nbSaDispo **Et** toutComplet=0 **Faire**

// Initialisation de toutComplet à 1, il est à 0 si le procédé est incomplet

toutComplet<--1

// Pour chaque ligne du tableau tabProcedes

**Pour** i allant de 1 à tailleTabProcedes **Faire**

**Si** tabProcedes[i][1]="0" **Alors**

in<--tabProcedes[i][1+3\*(nbTotActivite-1)]

// Services copiés dans copieLigne pour mémorisation

**Pour** j allant de 1 à 3\*nbSaDispo **Faire**

copieLigne[j]<--tabProcedes[i][j+1]

// Initialisation PremiereFois=0

premiereFois<--0

// Initilisation trouveIn à 0

trouveIn<--0

// Pour chaque ligne du tableau tabsadispo

**Pour** k allant de 1 à nbSaDispo **Faire**

// Si in est égal au flux d'entrée de la ligne i du tableau

**Si** in=tabsadispo[k][2] **Alors**

// Test si flux Out déjà existant dans le procédé

outDejaExistant<--0

out<--tabsadispo[k][3]

```

Pour j allant de 1 à nbTotActivite Faire
  Si out=tabProcedes[i][2+3*j] Alors
    outDejaExistant<--1
  Si outDejaExistant=0 Alors
    // Si un In pertinent trouvé
    trouveIn<--1
    // Si c'est la première fois
    Si premiereFois=0 Alors
      // Incréméntation des colonnes de la ligne en cours
      tabProcedes[i][ 2+3*nbTotActivite]= tabsadispo[k][2]
      tabProcedes[i][ 3+3*nbTotActivite]= tabsadispo[k][3]
      tabProcedes[i][ 4+3*nbTotActivite]= tabsadispo[k][4]
      // premiereFois prend la valeur 1
      premiereFois<--1
      // Complétude du procédé
      Si tabsadispo[k][3]=produitFinal Alors
        // Procédé complet
        tabProcedes[i][1]<--"1"

      Sinon
        // Pprocédé incomplet
        tabProcedes[i][1]<--"0"
        toutComplet<--0
      // Sinon (premiereFois =1 ) (on écrit un ligne de plus)
    Sinon
      // Copie du début du procédé (la ligne) grâce à copieLigne
      Pour j allant de 1 à 3*nbSaDispo Faire
        tabProcedes[indLigneTabProcedes][j+1]<--copieLigne[j]
      // Copie colonnes suivantes depuis tabsadispo
      tabProcedes[indLigneTabProcedes][ 2+3*nbTotActivite]= tabsadispo[k][2]
      tabProcedes[indLigneTabProcedes][ 3+3*nbTotActivite]= tabsadispo[k][3]
      tabProcedes[indLigneTabProcedes][ 4+3*nbTotActivite]= tabsadispo[k][4]
      // Procédé complet
      Si tabsadispo[k][3]=produitFinal Alors
        // Procédé complet : 1 dans la première colonne
        tabProcedes[indLigneTabProcedes][1]<--"1"

```

```

        Sinon
            // Procédé incomplet : 0 dans la première colonne
            tabProcedes[indLigneTabProcedes][1]<--"0"
            toutComplet<--0
        Fin Si
        // Incrémentation d'une ligne indLigneTabProcedes car une ligne a été écrite
        indLigneTabProcedes<--indLigneTabProcedes+1
    Fin Si
    Fin Pour
    // Fin si flux In trouvé
    Fin Si
    //Fin pour toutes lignes de tabSaDispo
    Fin Pour
    // Si flux In non trouvé de
    Si trouveIn=0 Alors
        // Ligne vidée
        Si premiereFois<--0 Alors
            ind<--j;
        Sinon
            ind<--indLigneTabProcedes-1
        Fin Si
        Pour j allant de 2 à 3*nbSaDispo+1 Faire
            tabProcedes[ind][j]= null
            tabProcedes[ind][1]<--"2"
        Fin Pour
    Fin Si
    // Fin si 1ère colonne à 0
    Fin Si
    // Pour pour toutes lignes tabProcedes
    Fin Pour
    // Définition taille de tabProcedes
    tailleTabProcedes<--indLigneTabProcedes
    // Incrémentation nbTotActivite
    nbTotActivite<--nbTotActivite+1
    Fin Tant que
    Fin

```

## Annexe 7 : Guide d'entretiens

### *Proposition d'un guide d'entretien pour la collecte de données dans le cadre e la mise en place d'une bioraffinerie agile*

---

#### **I. Contextualisation**

##### Remerciements

Je vous remercie de m'accorder du temps pour cet entretien.

##### Présentation – Structure – Sujet de l'interview

Je suis Michelle Houngré, étudiante en doctorat au Laboratoire de Génie Chimique à Toulouse.

Nous menons avec 4 chercheurs du LGC et en partenariat industriel avec SOLAGRO un projet de recherche qui s'appelle ARBRE pour Agilité des Bioraffineries. Ce projet a pour objectif de repenser la chaîne de transformation de la biomasse en valorisant les acteurs locaux, en développant une logique de collaboration et de mutualisation.

##### Le « pourquoi de l'interview »

Pour ce faire, il est indispensable que nous ayons une bonne connaissance des activités effectuées par les acteurs de cette chaîne de transformation de la biomasse. Nous avons donc besoin de comprendre votre métier vos difficultés, vos besoins, vos enjeux.

#### **II. Consignes de l'entretien**

##### Déroulement de l'entretien

Tout d'abord, cet entretien sera anonyme et ne sera utilisé qu'à des fins scientifiques. Il ne sera en aucun diffusé.

Par la suite, acceptez-vous d'être enregistré ? L'intérêt principal est de retranscrire le plus fidèlement possible nos échanges, afin d'explorer au mieux vos réponses.

Le temps prévu au maximum est d'1h.

Il n'y a pas de bonne ou de mauvaise réponse. Ce qui m'intéresse est votre expérience et votre point de vue. Vos réponses sont complètement libres.

#### **III. 1<sup>ère</sup> question de l'entretien : S'intéresser à l'interviewé**

- « Cela incite la personne à adopter une posture réflexive, c'est à dire à prendre du recul pour mieux analyser, faire ressortir (par la synthèse) les éléments marquants.
- Cela vous permet de repérer les caractéristiques d'élocution de votre interlocuteur : a-t-il répondu facilement, fait-il de grandes descriptions, parle-t-il vite ou lentement...Ainsi vous pouvez adapter vos questions en fonction de ses spécificités.
- Cela facilite la confiance de la personne qui « sait répondre à la question » et lui permet de constater que vous l'écoutez avec bienveillance »

*Camille Jonchères, Intervention 07/12/2016, Mastère Eco-Ingénierie, P4 La méthode de l'entretien sociologique*

Pouvez-vous vous présenter succinctement (profession, ancienneté, positionnement dans une organisation, ...) ?

#### **IV. Les grands thèmes de l'entretien**

Ils découlent de la construction du méta-modèle ainsi que de la présentation faite par SOLAGRO.

1) Pouvez-vous me parler de votre **environnement de travail** ? (Question volontairement vaste)

- Territoire (nom, type, ...)
- Gisement (accessibilité, localisation, nombre, surface, ...)
- **Production agricole combinée (céréales, animaux, bois, ...)**
- Proximité avec les habitations ou des établissements recevant du public
- Biomasse éventuelle exploitée
- Saisonnalité
- Appartenance à une coopérative

2) AÀ **quel moment** et de **quelle manière** intervenez-vous dans la **transformation de la biomasse** ?

- Opération(s) unitaire(s) effectuée(s)
- Ressources mises en œuvre (humaine, matériel, ...)
- Organisation de la rémunération □ **diversification activité**
- Répartition du coût de l'opération unitaire

3) Travaillez-vous en **partenariat** avec d'**autres professionnels** du territoire ou en dehors du territoire ?

- Si non □ pour quelles raisons ?
- Si oui □ qui sont-ils ? quels métiers exercent-ils ? de quels outils disposent-ils ? êtes-vous satisfait de ce partenariat ? comment s'est monté ce partenariat ? auriez-vous des améliorations à apporter pour ce partenariat ?

4) Quelles sont les **difficultés** que vous rencontrez et comment les surmonter vous ?

- Contraintes ressenties (administratives, techniques, relationnelles, ...)
- Menaces (T)
- Externalités négatives
- Faiblesses (W)

5) Quelles sont les **retombées positives** de votre activité que ce soit pour vous-même, votre propre activité, votre territoire ou encore votre branche professionnelle ?

- Forces (S)
- Contribution de l'activité à des valeurs
- Opportunités (O)
- Externalités positives
-

## **V. Ouverture**

Une vision prospective est suggérée. Elle permet d'avoir une idée de la prise en compte de l'existence d'un nouvel outil dans l'environnement de travail des interviewés.

Comment pensez-vous **améliorer** votre contribution à la valorisation de la biomasse ?

## **VI. Conclusion**

### Remerciements

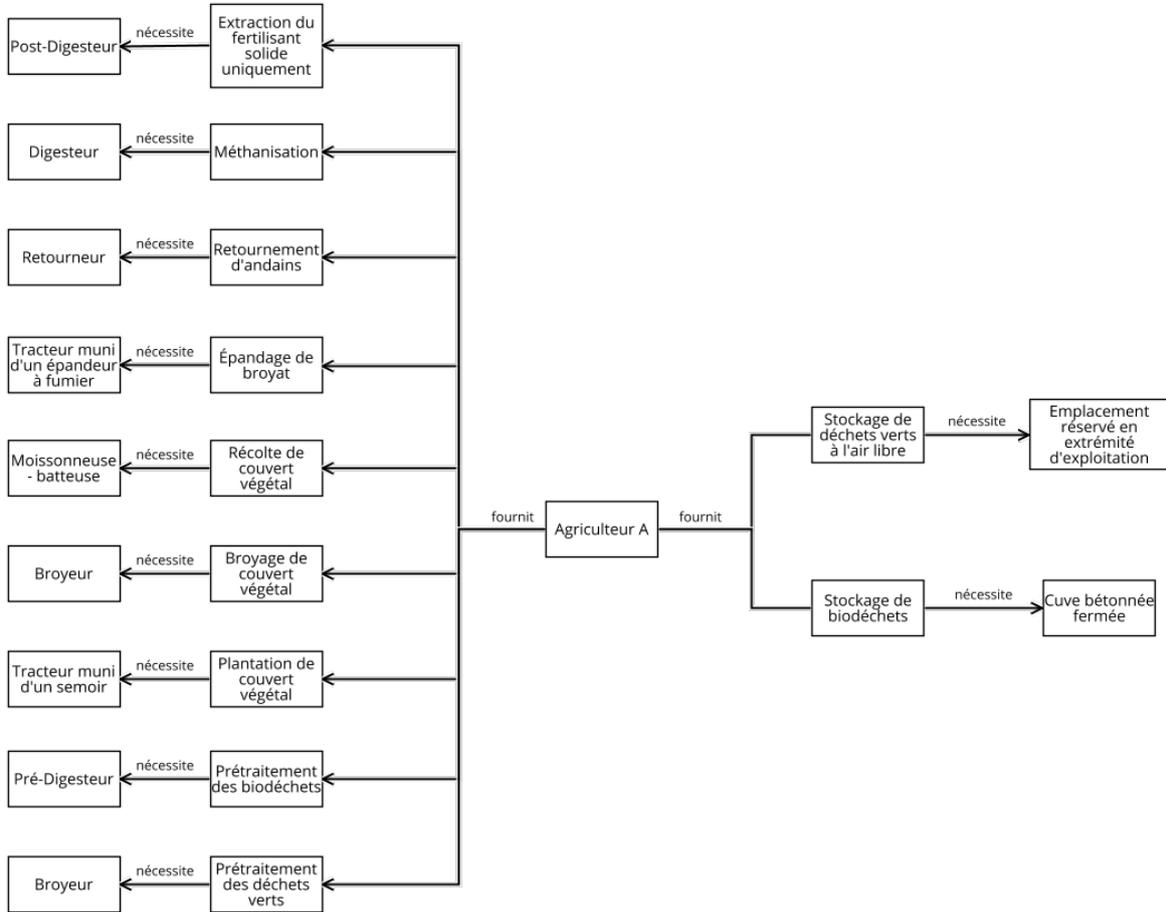
Je tiens à nouveau à vous remercier pour le temps que vous m'avez consacré ainsi que pour la qualité de vos réponses.

### Modalités de restitution de l'entretien

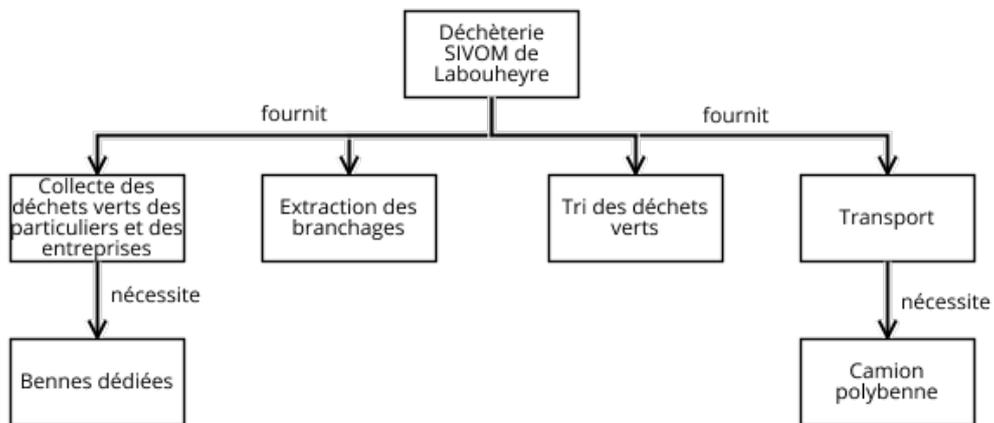
Cet entretien fera l'objet d'une transcription écrite pour une analyse qualitative. Si vous le souhaitez, nous pouvons vous faire part de cette retranscription.

## Annexe 8 : Modèles de partenaires relatifs au cas d'étude

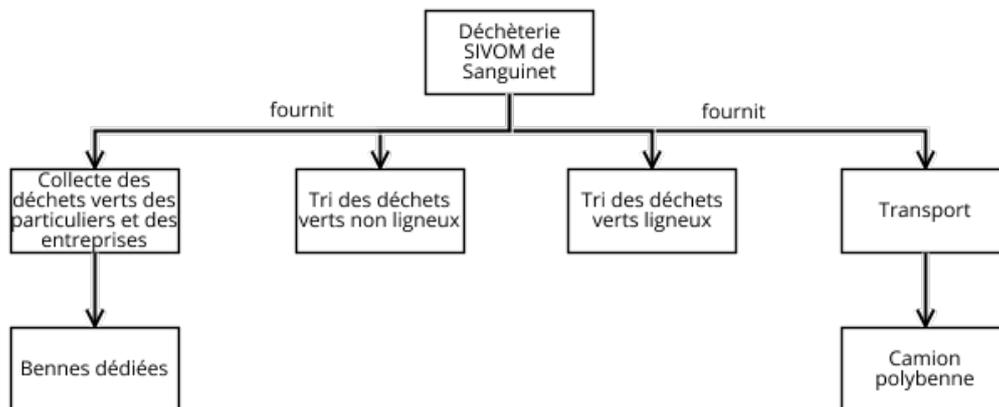
### Agriculteur



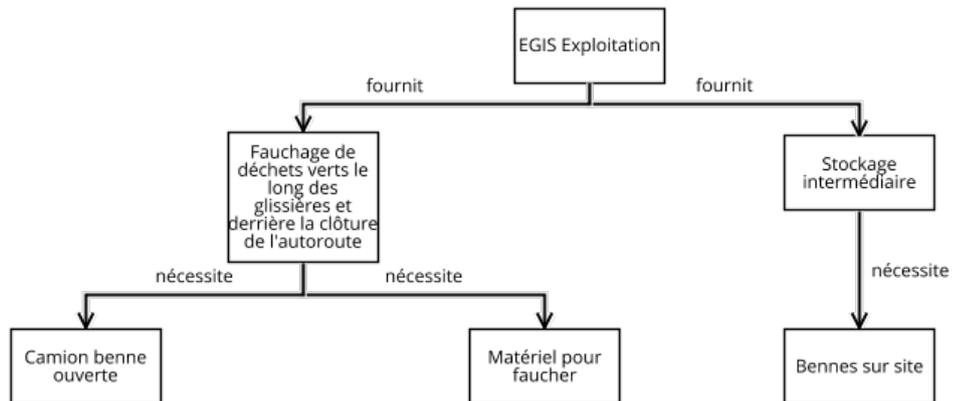
### Déchèterie SIVOM Labouheyre



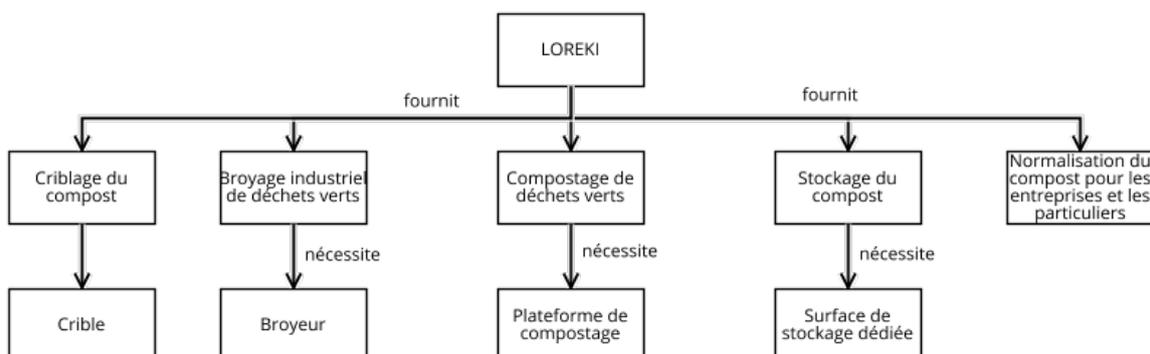
### Déchèterie SIVOM Sanguinet



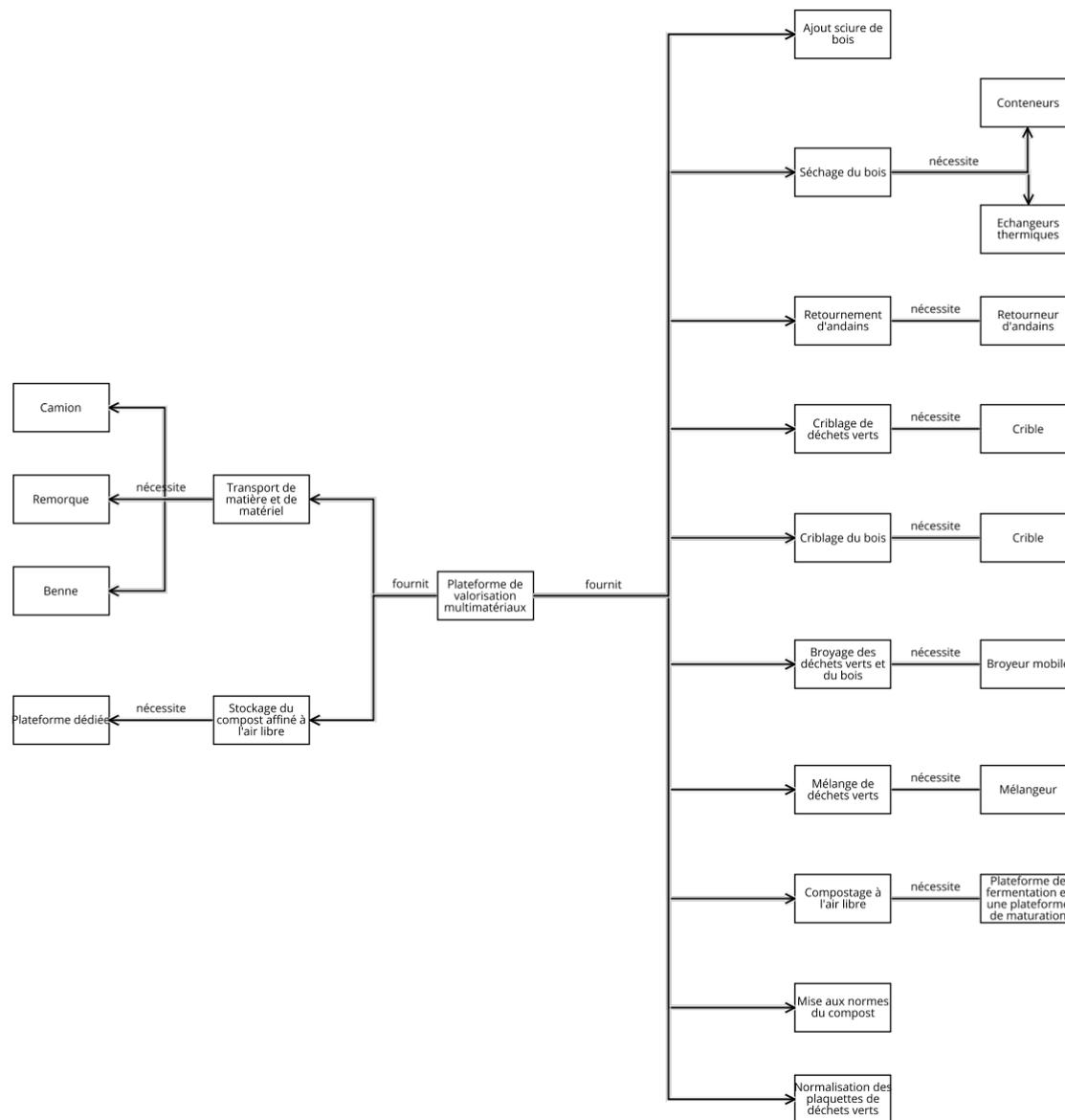
### EGIS Exploitation



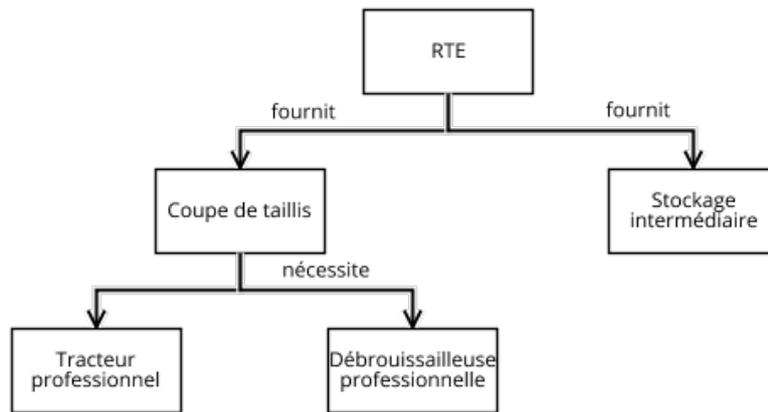
### LOREKI



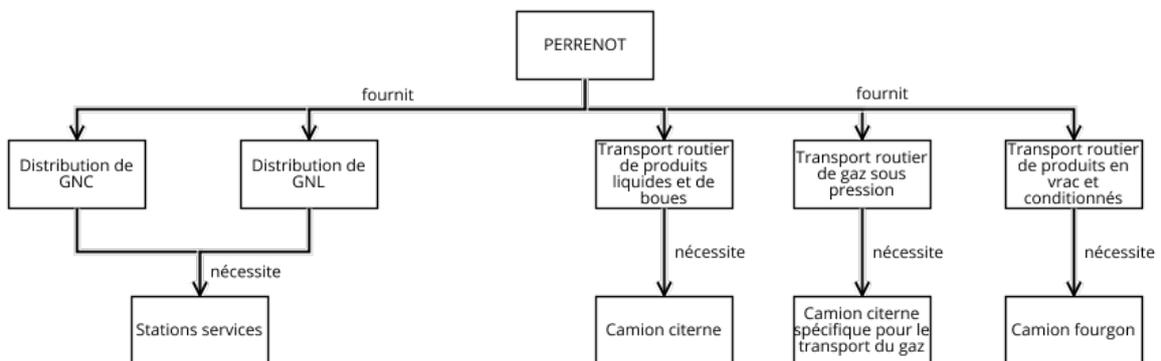
Plateforme de valorisation



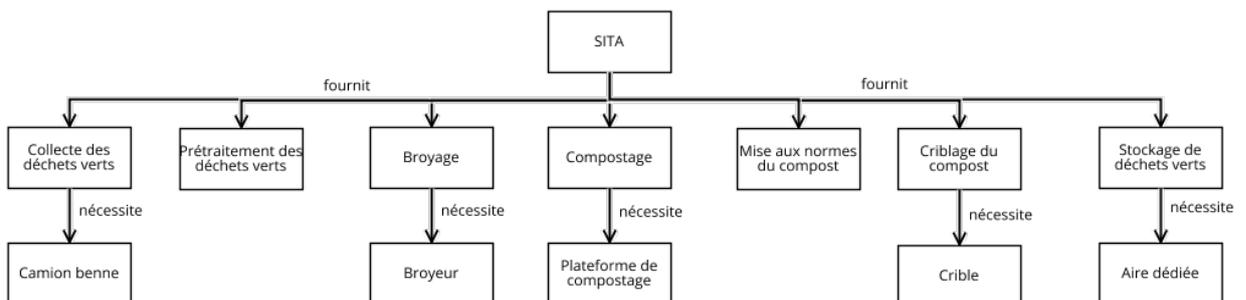
RTE



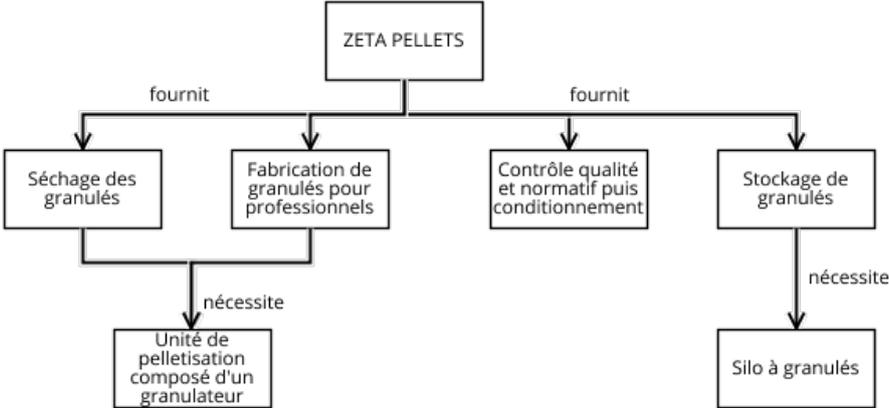
PERRENOT



SITA



ZETA PELLETS

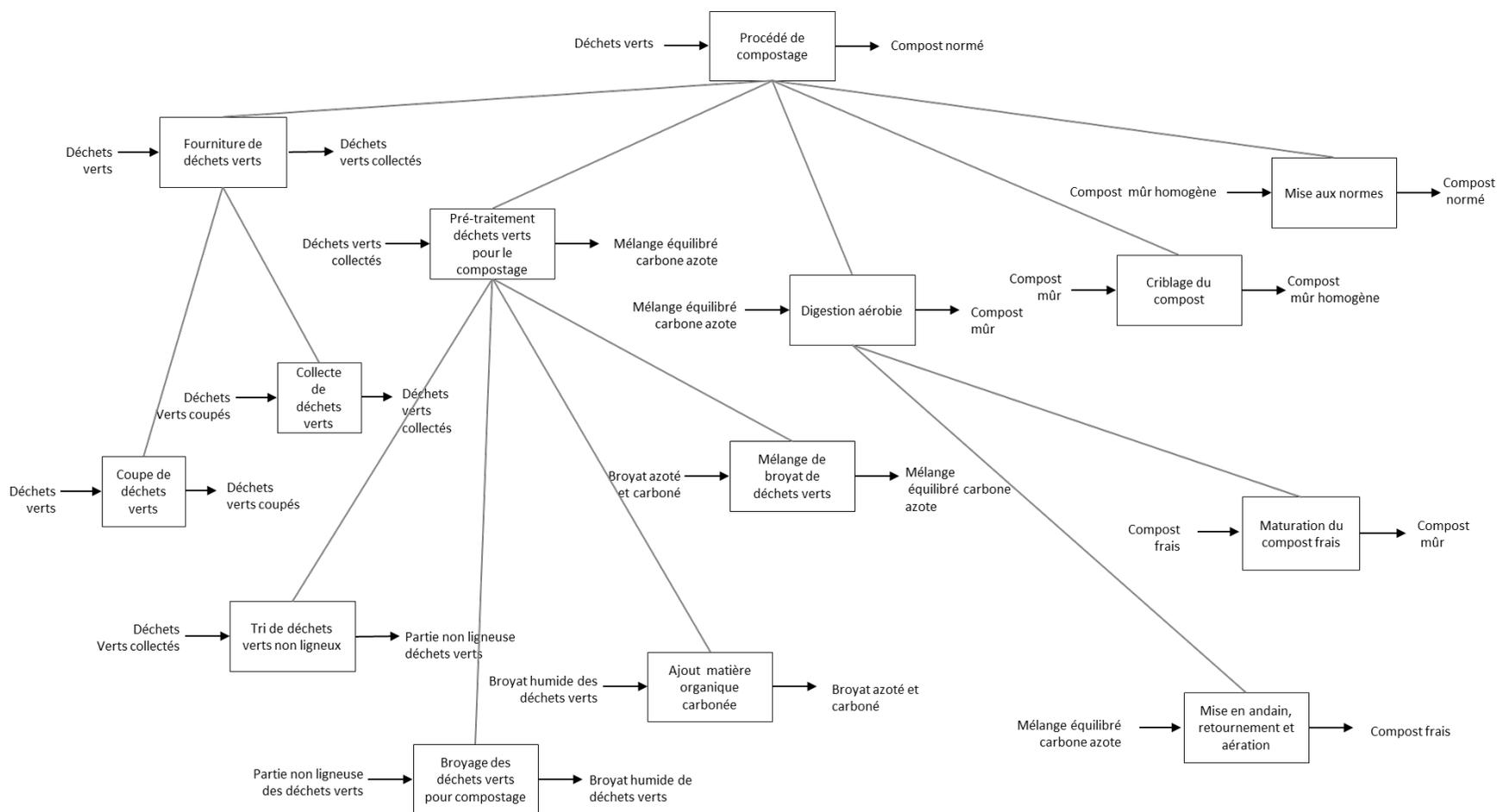


## Annexe 9 : Données relatives aux acteurs

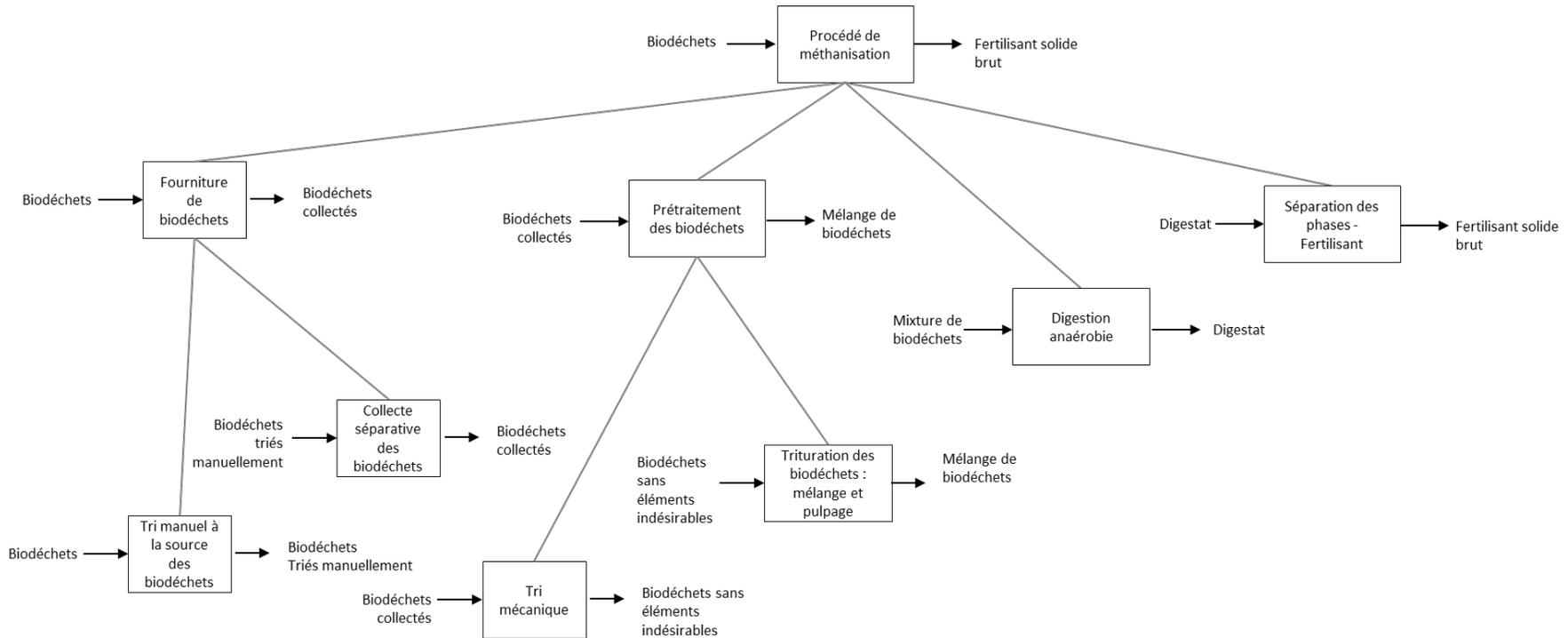
ID	Nom	RaisonSociale	Adresse	CodeAPE	Type de services proposé par les acteurs		
					Transformation	Stockage	Transport
1	Agriculteur A	SCI BLETENDRE	Route du Puymenjon 40110 Solférino	0111Z	x	x	
2	Entreprise DECHSIVL	Déchèterie Labouheyre	Rue de la Grande Lande, 40210 Labouheyre	3811Z	x		x
3	Entreprise DECHSIVS	Déchèterie Sanguinet	190 rue des Virés Vents 40460 Sanguinet	3811Z	x		x
4	Entreprise E	EGIS Exploitation	14 Rue du Juston, 40260 Castets	5221Z	x	x	
5	Entreprise L	LOREKI	64250 Itxassou	2015Z	x	x	
6	Entreprise P	PERRENOT	870 rue des Mousquetaires, 40270 Castets	4941B	x		x
7	Entreprise PVM	Plateforme de valorisation multimatériaux PVM	75 rue du Tuc 40210 Labouheyre	3821Z	x	x	x
8	Entreprise R	RTE	3559-2507 Route de Petepau, 4 02800 Saint-Pierre-du-Mont	3512Z	x	x	
9	Entreprise SIT	SITA	113 Avenue de Toulouse, 31750 Escalquens	3811Z	x	x	
10	Entreprise Z	ZETA PELLET	2208 Route de Grasse, 06600 Antibes	4778B	x	x	

## Annexe 10 : Modèles des procédés étudiés dans le cas d'étude

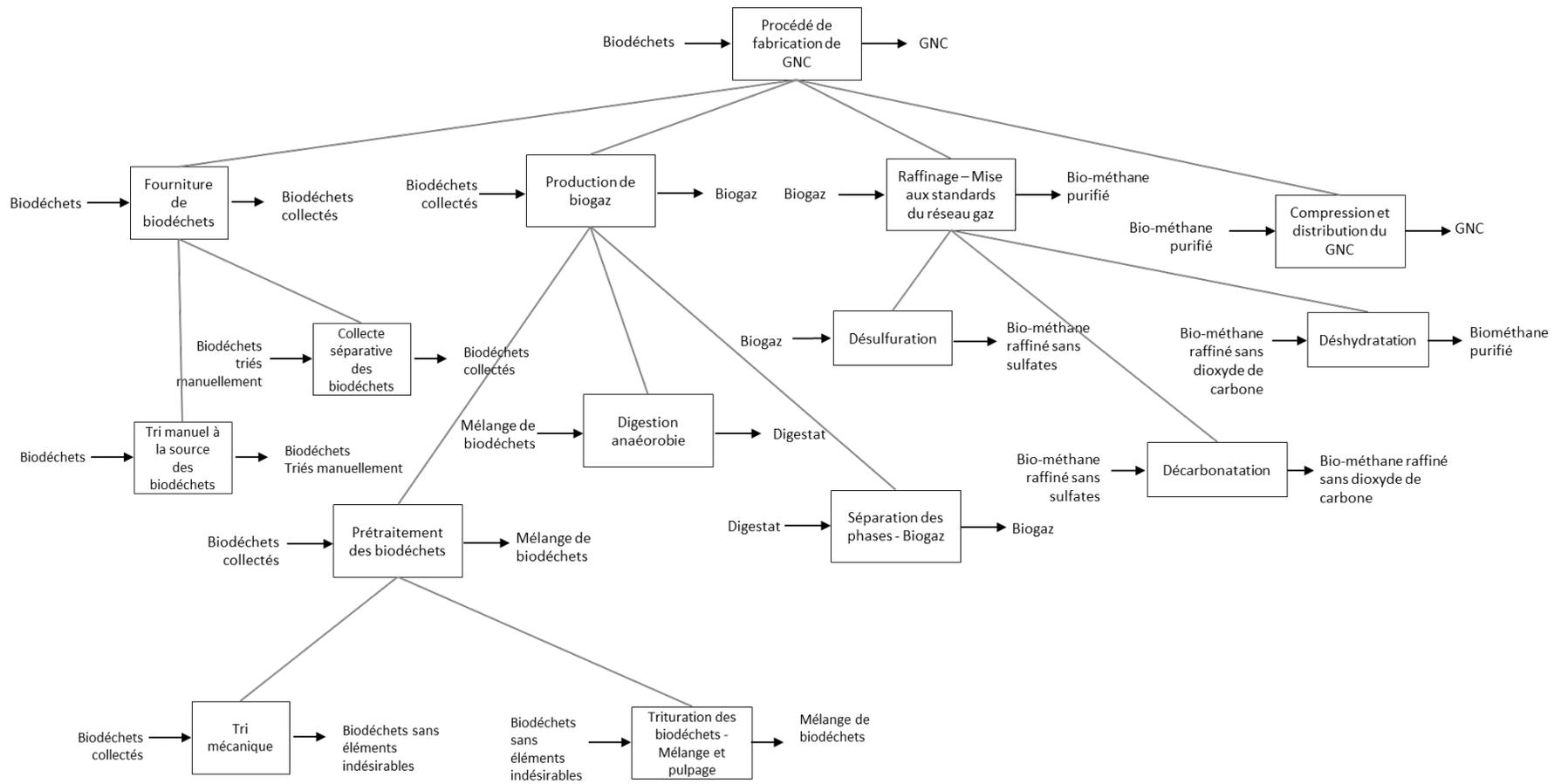
### Compostage



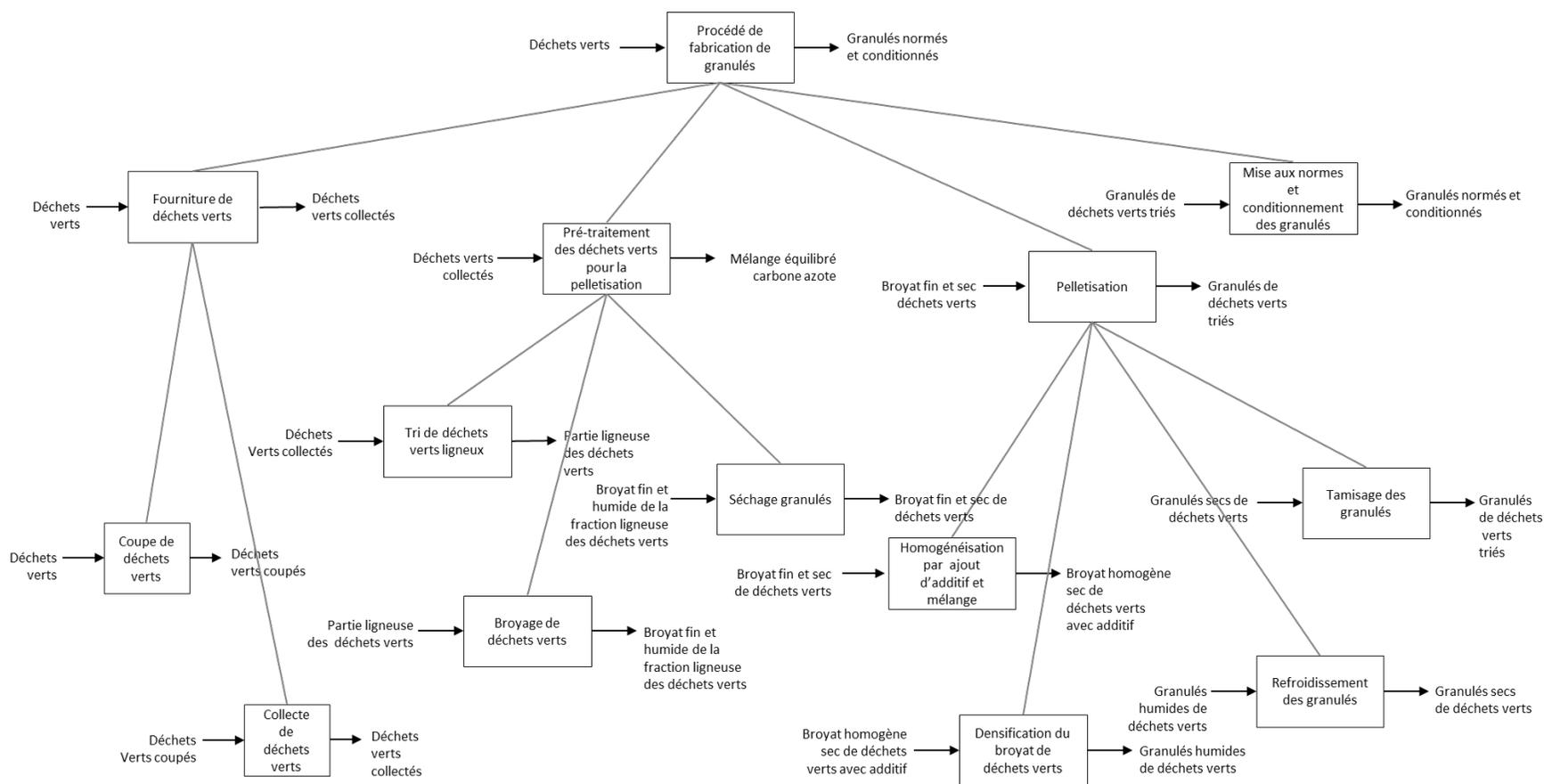
### Méthanisation par voie liquide



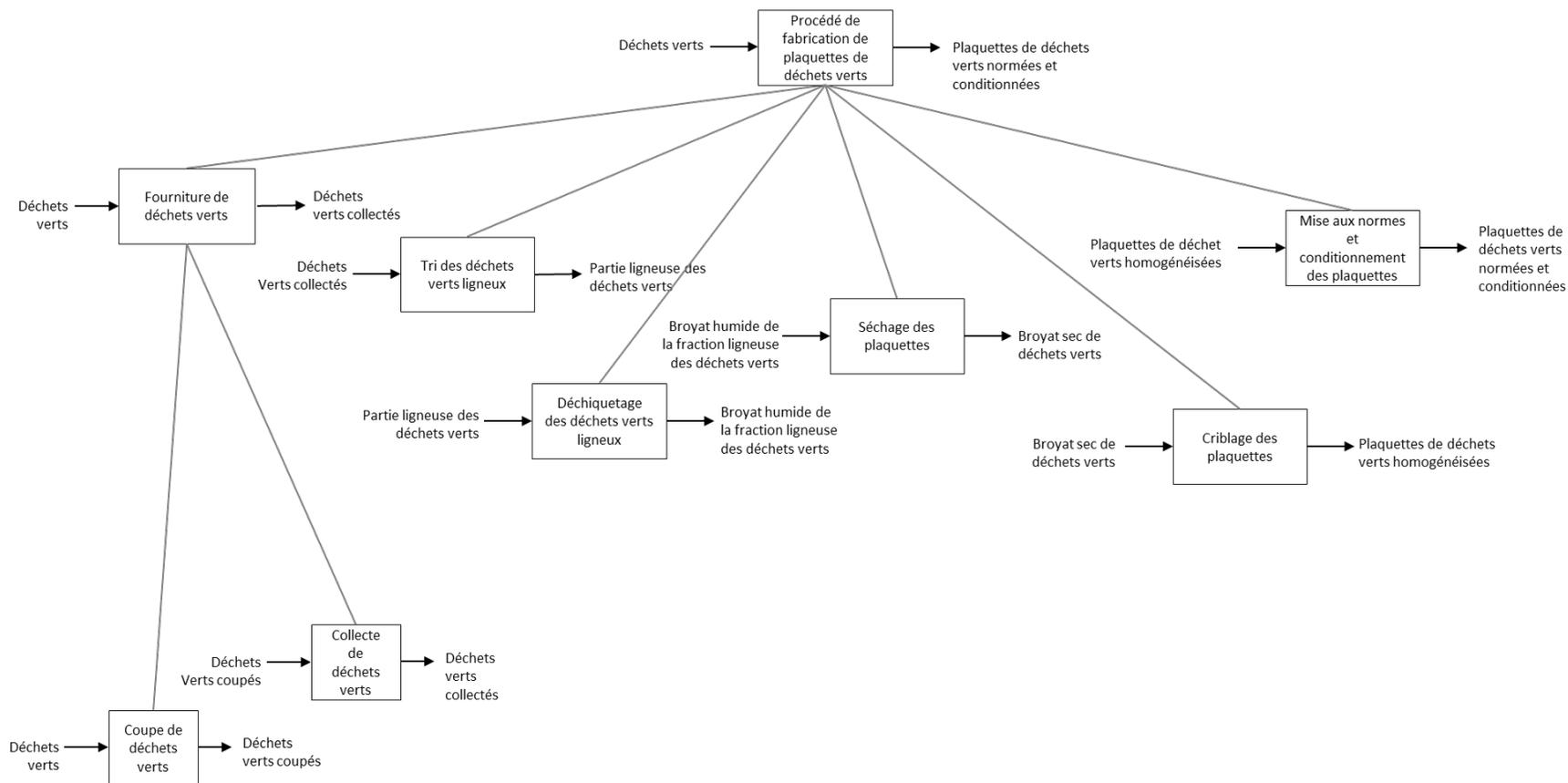
Procédé de fabrication de GNC



Procédés de fabrication de granulés



Procédé de fabrication de plaquettes



## Annexe 11 : Référentiel des activités du cas d'étude

- 1 - Procédé de compostage - Déchets verts - Compost normé
- 2 - Procédé de méthanisation par voie liquide - Biodéchets - Fertilisant solide brut
- 3 - Procédé de fabrication de plaquettes de déchets verts - Déchets verts - Plaquettes de déchets verts conditionnées
- 4 - Procédés de transformation de granulés - Déchets verts - Granulés normés et conditionnés
- 5 - Procédé de fabrication de GNC - Biodéchets - GNC
- 6 - Fourniture de déchets verts - Déchets verts - Déchets verts collectés
- 7 - Prétraitement des déchets verts - Déchets verts collectés - Mélange équilibré carbone azote
- 8 - Digestion aérobie - Mélange équilibré carbone azote - Compost mûr
- 9 - Criblage du compost - Compost mûr - Compost mûr homogène
- 10 - Mise aux normes - Compost mûr homogène - Compost normé
- 11 - Fourniture des biodéchets - Biodéchets - Biodéchets collectés
- 12 - Prétraitement des biodéchets - Biodéchets collectés - Mélange de biodéchets
- 13 - Digestion anaérobie - Mélange de biodéchets - Digestat
- 14 - Séparation des phases - Fertilisant - Digestat - Fertilisant solide brut
- 15 - Tri manuel à la source des biodéchets - Biodéchets - Biodéchets triés manuellement
- 16 - Collecte séparative des biodéchets - Biodéchets triés manuellement - Biodéchets collectés
- 17 - Tri mécanique - Biodéchets collectés - Biodéchets sans éléments indésirables
- 18 - Trituration des biodéchets - Mélange et pulpage - Biodéchets sans éléments indésirables - Mélange de biodéchets
- 19 - Séchage plaquettes - Broyat humide de la fraction ligneuse des déchets verts - Broyat sec de déchets verts
- 20 - Séchage granulés - Broyat fin et humide des déchets verts - Broyat fin et sec de déchets verts
- 21 - Criblage des plaquettes - Broyat sec de déchets verts - Plaquettes de déchets homogénéisées
- 22 - Mise aux normes et conditionnement des plaquettes - Plaquettes de déchets homogénéisées - Plaquettes de déchets verts conditionnées
- 23 - Prétraitement des déchets verts pour la pelletisation - Déchets verts collectés - Broyat fin et sec de déchets verts
- 24 - Pelletisation - Broyat fin et sec de déchets verts - Granulés de déchets verts triés
- 25 - Mise aux normes et conditionnement des granulés - Granulés de déchets verts triés - Granulés normés et conditionnés
- 26 - Production de biogaz - Biodéchets collectés - Biogaz
- 27 - Raffinage - Mise aux standards du réseau gaz - Biogaz - Bio-méthane purifié
- 28 - Compression et distribution du GNC - Bio-méthane purifié - GNC
- 29 - Coupe de déchets verts - Déchets verts - Déchets verts coupés
- 30 - Collecte de déchets verts - Déchets verts coupés - Déchets verts collectés
- 31 - Tri des déchets verts ligneux - Déchets verts collectés - Partie non ligneuse déchets verts
- 32 - Tri des déchets verts non ligneux - Déchets verts collectés - Partie ligneuse des déchets verts
- 33 - Broyage de déchets verts pour compostage - Partie non ligneuse déchets verts - Broyat humide de déchets verts
- 34 - Déchiquetage de déchets verts ligneux - Partie ligneuse des déchets verts - Broyat humide de la fraction ligneuse des déchets verts
- 35 - Broyage de déchets verts pour granulés - Partie ligneuse des déchets verts - Broyat fin et humide des déchets verts
- 36 - Ajout matière organique carbonée - Broyat humide de déchets verts - Broyat azoté et carboné
- 37 - Mélange de broyat de déchets verts - Broyat azoté et carboné - Mélange équilibré carbone azote
- 38 - Mise en andain, retournement et aération - Mélange équilibré carbone azote - Compost frais
- 39 - Maturation du compost frais - Compost frais - Compost mûr

- 40 - Homogénéisation par ajout d'additif et mélange - Broyat fin et sec de déchets verts - Broyat homogène sec de déchets verts avec additif
- 41 - Densification du broyat de déchets verts - Broyat homogène sec de déchets verts avec additif - Granulés humides de déchets verts
- 42 - Refroidissement des granulés - Granulés humides de déchets verts - Granulés secs de déchets verts
- 43 - Tamisage des granulés - Granulés secs de déchets verts - Granulés de déchets verts triés
- 44 - Séparation des phases - Biogaz - Digestat - Biogaz
- 45 - Désulfuration - Biogaz - Bio-méthane raffiné sans sulfates
- 46 - Décarbonatation - Bio-méthane raffiné sans sulfates - Bio-méthane raffiné sans dioxyde de carbone
- 47 - Déshydratation - Bio-méthane raffiné sans dioxyde de carbone - Bio-méthane purifié

## Annexe 12 : Superstructure du procédé de compostage

Les neuf alternatives théoriques pour exécuter le procédé de compostage sont présentées ci-dessous avec :

| lorem ipsum | : Activité de transformation de la matière  
lorem ipsum -> : Flux de matière entrant  
-> lorem ipsum : Flux de matière sortant

1 - Déchets verts -> | Procédé de compostage | -> Compost normé

2 - Déchets verts -> | Fourniture de déchets verts | -> Déchets verts collectés -> | Prétraitement des déchets verts | -> Mélange équilibré carbone azote -> | Digestion aérobie | -> Compost mûr -> | Criblage du compost | -> Compost mûr homogène -> | Mise aux normes | -> Compost normé

3 - Déchets verts -> | Coupe de déchets verts | -> Déchets verts coupés -> | Collecte de déchets verts | -> Déchets verts collectés -> | Prétraitement des déchets verts | -> Mélange équilibré carbone azote -> | Digestion aérobie | -> Compost mûr -> | Criblage du compost | -> Compost mûr homogène -> | Mise aux normes | -> Compost normé

4 - Déchets verts -> | Fourniture de déchets verts | -> Déchets verts collectés -> | Tri des déchets verts ligneux | -> Partie non ligneuse déchets verts -> | Broyage de déchets verts pour compostage | -> Broyat humide de déchets verts -> | Ajout matière organique carbonée | -> Broyat azoté et carboné -> | Mélange de broyat de déchets verts | -> Mélange équilibré carbone azote -> | Digestion aérobie | -> Compost mûr -> | Criblage du compost | -> Compost mûr homogène -> | Mise aux normes | -> Compost normé

5 - Déchets verts -> | Fourniture de déchets verts | -> Déchets verts collectés -> | Prétraitement des déchets verts | -> Mélange équilibré carbone azote -> | Mise en andain, retournement et aération | -> Compost frais -> | Maturation du compost frais | -> Compost mûr -> | Criblage du compost | -> Compost mûr homogène -> | Mise aux normes | -> Compost normé

6 - Déchets verts -> | Coupe de déchets verts | -> Déchets verts coupés -> | Collecte de déchets verts | -> Déchets verts collectés -> | Tri des déchets verts ligneux | -> Partie non ligneuse déchets verts -> | Broyage de déchets verts pour compostage | -> Broyat humide de déchets verts -> | Ajout matière organique carbonée | -> Broyat azoté et carboné -> | Mélange de broyat de déchets verts | -> Mélange équilibré carbone azote -> | Digestion aérobie | -> Compost mûr -> | Criblage du compost | -> Compost mûr homogène -> | Mise aux normes | -> Compost normé

7 - Déchets verts -> | Coupe de déchets verts | -> Déchets verts coupés -> | Collecte de déchets verts | -> Déchets verts collectés -> | Prétraitement des déchets verts | -> Mélange équilibré carbone azote -> | Mise en andain, retournement et aération | -> Compost frais -> | Maturation du compost frais | -> Compost mûr -> | Criblage du compost | -> Compost mûr homogène -> | Mise aux normes | -> Compost normé

8 - Déchets verts -> | Fourniture de déchets verts | -> Déchets verts collectés -> | Tri des déchets verts ligneux | -> Partie non ligneuse déchets verts -> | Broyage de déchets verts pour compostage | -> Broyat humide de déchets verts -> | Ajout matière organique carbonée | -> Broyat azoté et carboné -> | Mélange de broyat de déchets verts | -> Mélange équilibré carbone azote -> | Mise en andain, retournement et aération | -> Compost frais -> | Maturation du compost frais | -> Compost mûr -> | Criblage du compost | -> Compost mûr homogène -> | Mise aux normes | -> Compost normé

## Résumé

Dans un contexte industriel instable où l'offre et la demande sont incertaines, les industries de procédés sont poussées à transformer leurs systèmes de production. Ce défi s'inscrit dans une transition globale intégrant les exigences liées au développement durable et portée par des tendances fortes. En effet, cette transformation doit tenir compte de la notion de services qui s'installe durablement dans l'industrie. Par ailleurs, l'intensification de la digitalisation impulsée par les technologies de l'industrie 4.0 crée de nouvelles perspectives d'organisation des moyens de production.

À cet effet, les communautés scientifiques du Génie des Procédés, telle que la Société Française du Génie des Procédés, s'accordent pour le développement d'une Usine du Futur. Les enjeux auxquels elle devra répondre sont multiples. Non contente de développer une approche incluant l'économie circulaire, l'industrie de procédés de demain sera numérique et virtuelle. De plus, elle devra adapter l'ensemble du système de production aux fluctuations de son environnement, tout en considérant l'acceptabilité sociale. Dans cette perspective, les initiatives actuelles proposent des solutions reposant majoritairement sur la flexibilité des opérations unitaires ainsi que la modularité du procédé pour une matière première et/ou un produit final fixé. Cela induit des investissements conséquents que ce soit dans les pilotes de laboratoire ou encore la conception d'unité de fabrication.

Pour remédier à ces difficultés, l'agilité des systèmes de production apparaît comme une solution, dépassant les concepts de modularité et de flexibilité déjà mis en œuvre dans ce domaine. Toutefois, il est constaté une absence de conceptualisation et de méthodes de mise en œuvre de l'agilité dans la discipline du Génie des Procédés. Ces travaux de thèse visent à combler ce manque en proposant un cadre méthodologique outillé pour l'apport d'agilité à l'ensemble de la chaîne de transformation de la matière. Ainsi l'agilité, telle que proposée, permet de comprendre non seulement la dynamique du procédé dans son environnement mais aussi de mobiliser des moyens de production adaptés, en cas de fluctuations.

L'objectif de ces travaux de thèse est de construire une chaîne de transformation de la matière supportée par une usine virtuelle résultant de la collaboration de services offerts par des acteurs à l'échelle d'un territoire. Un service de transformation permet de réaliser tout ou partie des étapes du procédé retenu, et est sélectionné selon les besoins. Le procédé est décentralisé en s'appuyant sur des installations existantes afin de s'adapter à la variabilité et à la dispersion de l'offre (mise en œuvre, exploitation). Dans cette perspective, la première étape de ces travaux de thèse consiste à concevoir un méta-modèle de l'environnement du procédé (acteurs, services, contexte, objectifs et performance). Un second méta-modèle est ensuite proposé pour représenter la connaissance sur les procédés décrits dans la littérature. Sur la base des résultats précédents, la troisième étape s'intéresse à la création d'un algorithme de déduction de la chaîne de transformation de la matière, intégrant les services logistiques nécessaires à sa bonne réalisation. Cet algorithme a donné lieu à la réalisation d'une preuve de concept logicielle.

L'usage de ce cadre méthodologique et outillé sera illustré dans le cas de la transformation de la biomasse, à l'aide de données réalistes. En effet, le bioraffinage est l'une des principales voies proposées pour mener la transition énergétique. Cependant, le système actuel de traitement de la biomasse, figé et hautement spécialisé, doit faire face à une grande variabilité en raison de plusieurs contraintes internes et externes (qualité, quantité, pureté, etc.). Pour faire face à cette instabilité, il est nécessaire de faire preuve d'agilité tant en termes de procédé de transformation que d'acteurs et de réseaux logistiques.

**Mots clés :** Génie des Procédés, Agilité, Modélisation et traitement de la connaissance, Servicisation, Collaboration inter-organisationnelle, Système d'aide à la décision

## Abstract

In an unstable industrial context where supply and demand are uncertain, process industries are pushed to transform their production systems. This challenge is part of a global transition integrating the requirements of sustainable development and driven by strong trends. Indeed, this transformation have to take into account the notion of services that is becoming a well-established feature in industry. In addition, the intensification of digitalization driven by Industry 4.0 technologies creates new perspectives for the organization of production means.

To this end, the scientific communities of Process Engineering, such as the French Society of Process Engineering, agree on the development of a Factory of the Future, for which there are different issues to reach. As well as developing an approach integrating the circular economy, the process industry of tomorrow will be digital and virtual. It will have to adapt the entire production system to fluctuations of its environment, while considering social acceptability. In this perspective, current initiatives propose solutions based mainly on the flexibility of unit operations as well as the modularity of the process for a fixed raw material and/or final product. This leads to significant investments in laboratory pilots or in the design of manufacturing units.

To overcome these difficulties, the agility of production systems appears as a solution, going beyond the concepts of modularity and flexibility that have been already implemented in this field. However, there is a lack of conceptualization and implementation methods of agility in the discipline of Process Engineering. This thesis aims to fill this gap by proposing a methodological framework for bringing agility to the entire chain of matter transformation. Thus, agility, as proposed, allows to understand not only the dynamics of the process in its environment but also to mobilize adapted production means, in case of fluctuations.

The objective of this thesis work is to build a matter transformation chain supported by a virtual factory resulting from the collaboration of services offered by actors at the scale of a territory. A transformation service allows to realize all or part of the steps of the required process, and is selected according to the needs. The process is decentralized by relying on existing facilities in order to adapt to the variability and dispersion of the offer (implementation, operation). In this perspective, the first step of this thesis work consists in designing a meta-model of the process environment (actors, services, context, objectives and performance). A second meta-model is then proposed to represent the knowledge on the processes described in the literature. On the basis of the previous results, the third step focuses on the creation of an algorithm for deducing the matter transformation chain, including the logistic services needed for its proper realization. This algorithm led to the realization of a software proof of concept.

The use of this methodological and tooling framework will be illustrated in the case of biomass transformation, using realistic data. Indeed, biorefinery is one of the main ways proposed to lead the energy transition. However, the current fixed and highly specialized biomass processing system faces a high variability due to several internal and external constraints (quality, quantity, purity, etc.). To cope with this instability, agility is needed both in terms of the process and the actors and logistics networks.

**Keywords:** Process Engineering, Agility, Knowledge meta-modeling and processing, Servitization, Inter-organizational collaboration, Decision support system