



HAL
open science

Habilitation à diriger des recherches

Julie Jimenez

► **To cite this version:**

Julie Jimenez. Habilitation à diriger des recherches: Intégration des bioprocédés de valorisation des résidus organiques pour une gestion durable des agroécosystèmes.. Sciences de l'environnement. Université de Montpellier, 2023. tel-04324496

HAL Id: tel-04324496

<https://hal.science/tel-04324496>

Submitted on 5 Dec 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.



Habilitation à Diriger des Recherches

Spécialité : Génie des Procédés

Mémoire présenté par :

Julie JIMENEZ

Chargée de Recherche-INRAE

**Intégration des bioprocédés de valorisation
des résidus organiques pour une gestion
durable des agroécosystèmes**

INRAE, UR0050 LBE Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, Narbonne



" Je déclare avoir respecté, dans la conception et la rédaction de ce mémoire d'HDR, les valeurs et principes d'intégrité scientifique destinés à garantir le caractère honnête et scientifiquement rigoureux de tout travail de recherche, visés à l'article L.211-2 du Code de la recherche et énoncés par la Charte nationale de déontologie des métiers de la recherche et la Charte d'intégrité scientifique de l'Université de Montpellier. Je m'engage à les promouvoir dans le cadre de mes activités futures d'encadrement de recherche."

Remerciements

Par où commencer....

Je souhaite dédier ce manuscrit et bilan de mes 15 ans dans le monde de la recherche à deux personnes sans qui je ne serais pas devenue ce que je suis. Un grand, énorme, gigantesque MERCI à **Jean-Philippe Steyer et Dominique Patureau**. Depuis que je suis « toute petite », vous avez cru en moi, avez misé sur moi, m'avez soutenue (dans les bons comme dans les mauvais moments) et m'avez beaucoup apporté. Jean-Phi, tu as toujours su comment me pousser pour avancer, pour m'améliorer et tu y parviens encore et toujours. Domi, sans toi cette thématique de recherche n'existerait pas. Tu es mon soutien number one !

Je souhaite également dédier ce manuscrit au **LBE**. Tout est parti de ce labo ... pour finalement y revenir !

Je me souviens encore de ma dernière année à l'IUP de Perpignan délocalisée au LBE en 2004, où déjà, Jean-Phi, tu avais donné le ton et m'avais donné envie de faire ce que je fais aujourd'hui, et toi Domi, faisais office de « maman » pour nous jeunes novices sortis de l'œuf. Tout est parti du LBE. A partir de là et de mon stage à l'INSA de Toulouse (auprès d'**Etienne Paul**, un autre mentor à mes yeux dans le domaine de la recherche), tout s'est enchaîné. Diplômée ingénieure, j'ai eu l'opportunité de rejoindre Veolia et son centre de Recherche « Anjou Recherche » pour sept ans (une pensée pour mon cher collègue de toujours **Pascal Boisson**). Pendant cette période, j'ai eu l'occasion de recroiser Jean-Phi qui arriva à me convaincre de réaliser une thèse (merci **Emmanuel Trouvé et Stéphane Déléris**) avec en co-encadrant mon **cher Fabien Vedrenne** (une autre personne ayant marqué ma carrière). Et moi qui ne voulais pas faire de thèse ! Et puis, bizarrement, l'appel du sud et de l'académique se sont fait sentir. Je n'ai pu résister à l'envie de tout laisser, Veolia, CDI, Paris et revenir au LBE avec Domi pour un post-doctorat. Et puis, deux ans après, ce poste de chargée de recherche, en adéquation avec mes compétences et mes envies de recherche, me permet de revenir au LBE pour de bon.

Alors, **MERCI le LBE, à tout le collectif**, ce laboratoire où il fait bon travailler, où le climat familial et bienveillant règne et où la bonne humeur est de mise.

Plus spécifiquement, je souhaiterais remercier **Renaud Escudié et Eric Trably** pour votre bonne humeur, nos échanges (scientifiques ou non) et nos « joutes » verbales ! Je remercie **Nicolas Bernet**, actuel directeur du LBE, pour son écoute bienveillante et ses conseils avisés. Merci à **Rémi Servien** pour ses conseils de « vétéran » et à **Eric Latrille** pour son aide en statistiques et en autres domaines, et ce depuis mes débuts en thèse. Merci à **Diana Garcia Bernet** pour son aide et ses conseils sur la valorisation des résultats et la gestion de projets. Je souhaiterais remercier les techniciens (dont certains sont partis) et gestionnaires pour leur aide précieuse : **Philippe Sousbie, Nadine Delgènes, Pascal Gras, Guillaume Guizard, Denis Loisel, Nadine Le Thinh, Sylvie Farine et Stephanie Harmand**.

Je souhaiterais rendre hommage à **Michel Torrijos** qui est parti bien trop tôt. Nos discussions autour de la bioaccessibilité et l'hydrolyse me manquent et je n'oublie pas que nous voulions travailler ensemble sur la modélisation de la co-digestion...

Je remercie mes collègues devenus amis **Virginie Rossard, Clémence Pagès (Nounoune), Gabriel Capson** pour leur amitié et leur soutien de tous les jours ! Et ceux qui sont partis mais qui m'ont soutenu pendant ces 9 dernières années (**Thibaut Saur, Cyrille Charnier, Florian Paillet, Roman Moscoviz, Lucia Braga Nan, Noémie Figeac, Antoine Haddon, Elsa Rouches, Violette Turon, Alice**

Danel, Quentin Aemig, Morand Severac, Bastien Zennaro, Felipe Guilayn, et mon bon vieux Clément Van Vlierbergue).

Je remercie toutes les personnes que j'ai encadré au LBE et VERI et qui ont participé activement à mes recherches (Bastien, Quentin, Nicolas, Lucie, Chloé, Noémie, Louise, Claire, Clémentine, Tom, Jeanne, Ziren, Han, Camilla, Rémi, Axelle, Albane, Solène, Nicolas, Estelle, Cécile, Ziren, Paolo, Ségolène, Ulysse, Matthjis, Omar).

Je souhaite également remercier **Sabine Houot** qui suit ma thématique depuis le début de mon poste de chargée de recherche, avec qui j'ai beaucoup collaboré et qui m'a beaucoup apporté et appris.

Et enfin, je souhaiterais remercier tout particulièrement les trois doctorants que j'ai eus et ai encore le plaisir d'encadrer : **Felipe Guilayn, David Fernandez-Dominguez et Margaud Pereme**. Comme j'ai pu le dire en conclusion, encadrer des jeunes chercheurs, et notamment des doctorants est une expérience à part entière. Pour moi, il s'agit vraiment d'un partage et d'un échange mutuel. Je vous accompagne dans votre démarche scientifique de thèse, vous aiguille tout en vous laissant vous épanouir et mener votre projet (car c'est le vôtre) comme vous voulez le mener. Et vous, vous me nourrissez de réflexions, de discussions, vous me poussez à prendre du recul et à me questionner et cela fait énormément avancer mes réflexions et me fait mûrir. Grâce à vous, je me suis décidée à faire ce bilan de mes recherches afin de rebondir encore plus loin. MERCI !

Plus personnellement, je souhaiterais remercier ma famille, mes proches, qui ont toujours été là quoiqu'il arrive, et une dédicace profonde à mon père qui aurait été, je pense, fier de là où je suis arrivée.

Je souhaiterais remercier mon cher et tendre Romain. Je ne pensais pas prendre autant de temps à rédiger cet HDR ! Et toi non plus je pense ! Que de discussions autour de ça ! Mais que de soutien, de motivation, d'aide et de relecture de ta part !!!! Nos discussions scientifiques (ou non) sont source d'inspiration et je vous souhaite de collaborer ensemble scientifiquement (et moins scientifiquement) sur certains sujets à venir.

Je terminerai par remercier mes animaux (enfin, nos animaux) sans qui la rédaction du manuscrit aurait été impossible : Sirius, Helmy, Pandou et Phantom ... un zoo ambulante mais tellement affectueux, drôle et apaisant !

Et... MERCI à l'Echoppe Médiévale et à l'Antre pour le soutien infaillible toutes ces années et ces jeudis soirs. Narbonne ne serait pas Narbonne sans vous !

Table des matières

Liste des Figures	1
Liste des Tableaux	3
Introduction.....	4
Chapitre 1. Curriculum Vitae détaillé	5
1. Curriculum Vitae.....	6
2. Activités de recherche	7
3. Principales collaborations	16
4. Expertises et participation à des comités et jurys de thèse.....	16
5. Activités pédagogiques et administratives.....	18
6. Production scientifique	19
Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche.....	29
1. Contexte	30
1.1. Changements globaux et agroécologie	30
1.2. Déchets organiques et Bioraffinerie Environnementale : vers un changement de paradigme.....	30
1.3. Problématiques de recherche : INRAE et LBE	33
1.4. Stratégie de recherche	34
2. Axe 1 : Comment développer de nouveaux indicateurs pour optimiser la conception de la Bioraffinerie Environnementale ?	38
2.1. Démarche scientifique.....	38
2.2. Caractérisation de la matière organique et Indicateurs associés	42
2.3. Devenir des nutriments au sein des procédés de valorisation	46
2.4. Bilan.....	54
3. Axe 2 : Comment les procédés de valorisation des résidus impactent la qualité des produits résiduels organiques ?	56
3.1. Objectifs et questions de recherche.....	56
3.2. Evolution matière dans les procédés : variabilité des substrats	57
3.3. Evolution matière dans les procédés : variabilité des intrants et mécanismes	60
3.4. Impact de la variabilité des intrants sur les agroécosystèmes.....	61
3.5. Impact de la qualité des digestats et conditions opératoires	62
3.6. Variabilité de la qualité des produits et impacts des post-traitements	62
3.7. Variabilité des produits : hiérarchie des leviers d’actions et perspectives	66
4. Axe 3 : Comment réaliser l’ingénierie inverse dans un système de Bioraffinerie Environnementale dédié à la double valorisation énergétique et agronomique sous contrainte environnementale ?	69

4.1.	Objectifs et questions de recherche.....	69
4.2.	Modélisation des procédés : de la complexité des modèles au défi du couplage.....	70
4.3.	Optimisation multi-objectif d'une filière de méthanisation	76
4.4.	Bilan.....	78
Chapitre 3. Perspectives de recherche.....		81
1.	Axe 1 : Caractérisation et gestion des compromis.....	84
1.1.	Variables de caractérisation pour affiner la description des services rendus (énergétiques et agroécologiques)	84
1.2.	Variables de caractérisation fine pour la compréhension des processus.....	86
1.3.	Elaboration d'une base de données pour l'utilisation de la plateforme de modélisation	87
2.	Axe 2 : Compréhension des processus biologiques et leviers d'action.....	89
2.1.	Etude des processus biologiques	89
2.2.	Leviers d'actions et hiérarchisation.....	90
2.3.	Post-traitements.....	91
3.	Axe 3 : Modélisation et Optimisation : Ingénierie inverse	93
3.1.	Modélisation des bio/procédés.....	93
3.2.	Optimisation multi-objectif et couplage avec ACV	94
3.3.	Perspectives à long terme	96
Conclusion		97
Références Bibliographiques.....		98

Liste des Figures

Figure 1 : Expertises développées tout au long de ma carrière professionnelle au sein de la recherche	7
Figure 2 : Exemple de bioéconomie circulaire dans un territoire à forte empreinte animale (Dourmad et al., 2019).....	33
Figure 3 : Schéma de la Bioraffinerie Environnementale, thématique centrale au sein des recherches du LBE.....	33
Figure 4 : Schématisation de l'adéquation entre Gestion durable des déchets organiques et la Transition Agroécologique (Source : schéma personnel)	34
Figure 5 : Concept de l'« Ingénierie inverse » au service de la Bioraffinerie Environnementale et définition de ma stratégie de recherche.....	35
Figure 6 : Devenir de la matière pendant la méthanisation : application de ma thématique de recherche à la filière méthanisation et mes questions de recherches associées	36
Figure 7 : Représentation schématique des collaborations mises en place durant mes activités de recherche complémentaires à mes domaines d'expertises.....	37
Figure 8 : Place de la caractérisation au sein de la démarche scientifique de ma thématique de recherche.....	38
Figure 9 : Figures extraites de Yasui et al. (2006) et [JJ27]	40
Figure 10 : Notions de Bioaccessibilité, Biodisponibilité et Biodégradabilité nécessaires à la description des processus de biodégradation dans un procédé biologique.....	40
Figure 11 : Définition de la Biodégradabilité d'un intrant organique suivant deux axes : Bioaccessibilité (taille de compartiments) et Complexité de la MO des fractions (qualité)	41
Figure 12 : Démarche suivie pour la définition des concepts associés aux services rendus et procédés à caractériser.....	42
Figure 13 : Spectres de fluorescence 3D obtenus lors du fractionnement d'une boue [These_JJ].....	43
Figure 14 : Protocole schématisé de l'indicateur IsBaMO®	45
Figure 15 : Résultats proposés suite à l'analyse IsBaMO®	45
Figure 16 : Protocoles testés pour déterminer l'accessibilité et disponibilité de N et P basés sur [JJ25] pour N et (Grigatti et al., 2015) pour P.....	48
Figure 17 : Résultats obtenus sur l'étude des mécanismes de l'hydrolyse de divers substrats via l'utilisation du fractionnement IsBaMO [JJ10]	49
Figure 18 : Variables explicatives pour prédire la cinétique de biodégradabilité anaérobie des boues de STEP (adapté de [JJ27]).....	50
Figure 19 : Graphical abstract adapté sur la prédiction du potentiel méthane et du carbone organique minéralisable au sol à partir de l'IsBaMO® [JJ18].....	51
Figure 20 : Evolution du carbone et de l'azote organiques au cours de l'incubation sur sol d'un fumier bovin [JJ32]	53
Figure 21 : Questions de recherche associées au Génie Des Procédés au sein de la démarche scientifique de ma thématique de recherche	56
Figure 22 : Enjeu lié à la variabilité de la qualité des digestats issus de méthanisation.....	57
Figure 23 : Bilan matière appliquée au fractionnement IsBaMO aux bornes de deux digesteurs traitant des boues (gauche) et du fumier pailleux (droite).....	58
Figure 24 : Etude de la variabilité de la qualité agronomique globale des digestats d'origine urbains et agricoles en fonction des intrants de méthanisation [JJ12].....	59
Figure 25 : Etude de la variabilité de la qualité agronomique globale des digestats d'origine agricole en fonction des intrants de méthanisation (Concept-Dig, [PO7], [PO10], [JJ33]).....	59

Figure 26 : Etude et prédiction de la variabilité de la MO des digestats en fonction de la qualité de la MO de leurs intrants : analyses statistiques (a) et analyse de l'impact des variables décrivant les intrants sur la qualité des digestats (b) [JJ04] [PO8]	60
Figure 27 : Validation de la typologie Concept-Dig et impact de la recette entrante sur la qualité agronomique d'un digestat [PO7] [JJ33]	61
Figure 28 : Analyse ACP sur les digestats bruts, solides, liquides inventoriés dans le projet Concept-Dig [JJ33] [PO7], [PO10], [PO19]	63
Figure 29 : Distribution des indicateurs d'efficacité de séparation de phases développés dans [JJ13] (gauche) et répartition des éléments selon l'efficacité (faible et élevée) du séparateur de phases [JJ13] (droite).....	63
Figure 30 : Analyses ACP réalisées sur les digestats liquides et solides dans le cadre du projet Concept-Dig [JJ33] [PO7]	64
Figure 31 : Place de la modélisation au sein de la démarche scientifique de ma thématique de recherche.....	69
Figure 32 : Démarche scientifique suivie afin de définir un modèle de procédé	70
Figure 33 : Illustration de la problématique du couplage des modèles.....	71
Figure 34 : Résultats obtenus sur la modélisation de la filière de méthanisation des boues [PO25] [PO26] [JJ34].....	72
Figure 35 : Définition des concepts de biodégradation simultanée et séquentielle à partir des fractions IsBaMO®[JJ10]	73
Figure 36 : Schématisation de la modélisation filière de méthanisation à partir des modèles PLS obtenus pour la production de potentiel méthane [JJ18], de la qualité des digestats [JJ04] et du carbone minéralisable au sol [JJ18].....	75
Figure 37 : Schématisation de la prédiction de la qualité agronomique des digestats obtenu dans le projet Concept-Dig [PO7], [JJ33]	76
Figure 38 : Modèle de biodégradation de la MO exogène provenant des digestats dans le sol développé dans le cadre de la thèse de Margaud Pereme [JJ35]	78
Figure 39 : Plateforme de modélisation de la filière de méthanisation développée sous Python dans le cadre de la thèse de Margaud Pereme [PO9]	78
Figure 40 : Mise à jour de ma thématique de recherche déclinée en trois axes	83
Figure 41 : Adéquations et besoins des agroécosystèmes : théorie et questions de recherche.....	84
Figure 42 : Schématisation des questions de recherche associées à la gestion des compromis entre qualité des résidus organiques pour satisfaire les besoins pour la production d'énergie (méthanisation) et qualité des produits pour satisfaire les besoins des agroécosystèmes	85
Figure 43 : Démarche à mettre en place pour déterminer les variables de caractérisation sensibles à la prédiction des services rendus	86
Figure 44 : Démarche envisagée pour mettre en place une base de données de caractérisation IsBaMO® durable et utilisable pour réaliser la modélisation de filière.....	88
Figure 45 : Graphical abstract issu de la thèse de David Fernandez-Dominguez (2020-2023).....	89
Figure 46 : Questions de recherche associées à la rationalisation et compréhension de la variabilité de la qualité agronomique des digestats et leurs impacts sur les agroécosystèmes	91
Figure 47 : Schématisation de la problématique de recherche autour de la modélisation de la co-digestion des intrants en méthanisation.....	94
Figure 48 : Optimisation multi-objectif des services rendus par la filière méthanisation alimentée par les trois Axes de recherche.....	95
Figure 49 : L'ingénierie inverse, au-delà de l'optimisation multi-objectif de la filière de valorisation des résidus organiques.....	95
Figure 50 : Vision long-terme de ma thématique de recherche	96

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Bilan des travaux sur la caractérisation.....	55
Tableau 2 : Bilan des travaux sur l’Axe 2.....	66
Tableau 3 : Bilan des travaux sur la modélisation et l’optimisation de la filière	79

Introduction

« La **rétro-ingénierie**, ou **ingénierie inverse**, est l'activité qui consiste à étudier un objet pour en déterminer le fonctionnement interne, la méthode de fabrication, peut-être dans l'intérêt de le modifier. On parle également de **rétro-conception** dans le domaine du vivant. Le terme équivalent en anglais est *reverse engineering*. »

Cette définition, au cœur de ma thématique de recherche, reflète bien mon parcours en recherche, qu'elle soit dans le domaine privé ou public depuis 15 ans.

En effet, tout au long de mon parcours professionnel, j'ai eu à cœur d'étudier la valorisation des résidus organiques, que ce soit via des approches de caractérisation de la matière, de génie des procédés biologiques afin de « déterminer le fonctionnement interne, la méthode de fabrication » pour mieux comprendre les processus biologiques impliqués, les modéliser « peut-être dans l'intérêt de le modifier », et les optimiser.

Ce manuscrit décrit mes recherches passées, présentes et à venir répondent à cette définition appliquée à la thématique suivante : « **Intégration des bioprocédés de valorisation des résidus organiques pour une gestion durable des agroécosystèmes** » dans un contexte de transition à la fois énergétique et agroécologique. Il décrit également la mise en place de ma stratégie de recherche dédiée à résoudre cette problématique, stratégie appuyée notamment par la mise en place de projets de recherche (que ce soit en tant que coordinatrice ou contributrice), l'encadrement de stagiaires, doctorants, post-doctorants, ingénieurs et la valorisation des résultats afin de prétendre à l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches.

Après un Chapitre 1 dédié à la description de mon Curriculum Vitae, la description factuelle de mes activités de recherches et de mes encadrements ainsi que mes productions et valorisations scientifiques, le Chapitre 2 synthétise mes travaux de recherche, basés sur une description préalable du cadre, du contexte et des objectifs de mes recherches. Ce chapitre résume comment j'ai mis en place ma thématique via trois axes de recherches dont les piliers sont associés à mes trois domaines de compétences : la caractérisation matière, le génie des procédés et la modélisation des procédés. Il s'attèle à montrer, sous formes de questionnements, comment ces trois compétences sont le socle de ma thématique.

Le Chapitre 3 présente les perspectives de mes recherches sur les bases des résultats et accomplissements décrits dans le Chapitre 2. Dans cette partie, je propose un projet de recherche à court puis long terme autour de l'ingénierie inverse, en utilisant mes compétences pour les approfondir et aller plus loin sur la prise en compte des agroécosystèmes et les impacts environnementaux d'une filière de valorisation des résidus.

Enfin, je terminerai ce manuscrit par une conclusion et analyse plus générales sur mes activités de chercheur.

Chapitre 1. Curriculum Vitae détaillé

1. Curriculum Vitae

Etat Civil

Nom : JIMENEZ Adresse : 8 allée Bérénice, 11100 Narbonne
Prénom : Julie Situation familiale : Célibataire
Date de naissance : 03/10/1982 Tél : 06 78 93 46 25/ 04 68 42 51 76
Email : julie.jimenez@inrae.fr

Parcours professionnel



Depuis 2015 : Chargée de Recherche INRAE- Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement- Narbonne

Adaptation et intégration des bioprocédés de traitement des effluents et des résidus pour une gestion durable des agrosystèmes

Mots clés : *Caractérisation, Matière, Modélisation, Méthanisation, Digestat, Bioaffinerie Environnementale, Optimisation, Agroécologie*

2013-2015 : Post-doctorat à INRAE-Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement- Narbonne
Caractérisation de résidus organiques et modélisation des processus biologiques d'une filière de traitement de ces résidus – Projet RISQ-PRO (financé par ONEMA) : *Evaluation et réduction des risques de contamination par des polluants organiques dans le contexte de l'usage de Produits Résiduaire Organiques (PRO) sur sols agricoles*

- Devenir de la matière organique avec la **modification de modèles actuels de digestion anaérobie, compostage et d'épandage sur sol** ;
- **Développement d'une méthode de caractérisation** afin d'unifier les variables entrantes dans les modèles
- Devenir des micropolluants organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques) en lien avec la matière organique

2007-2013 : Ingénieure de recherche en modélisation des procédés biologiques de traitement des eaux usées à VEOLIA Environnement Recherche et Innovation-Maisons Laffitte

- Etude du procédé de **Digestion anaérobie** des boues d'épuration et d'ordures ménagères résiduelles
- **Modélisation des processus biologiques** de la **digestion anaérobie** des boues d'épuration et des **bioréacteurs à membranes** traitant des eaux usées
- **Caractérisation de la matière organique des résidus organiques liquides et solides** (développement d'outils de caractérisation innovants de la matière organique et sa biodégradabilité)

Diplômes universitaires

2012 Doctorat en Génie des Procédés - Université Montpellier II : Caractérisation de la matière organique par spectrofluorimétrie 3D et modélisation de la digestion anaérobie des boues d'épuration. **Collaboration VERI/INRAE LBE Narbonne.**
Directeur de thèse : Jean-Philippe STEYER (Directeur de Recherche, INRAE LBE Narbonne)

Co-encadrant de thèse : Fabien Vedrenne (Chercheur VERI, Maisons Laffitte)

Rapporteurs : Fabrice Béline (Directeur de Recherche, IRSTEA, Rennes) et Peter Vanrolleghem (Professeur, Université de Laval, Québec, Canada)

2007 Ingénieure en Génie des Procédés - Institut National des Sciences Appliquées (INSA) Toulouse

Stage fin étude (6 mois) : « Caractérisation d'effluents agro-alimentaires et modélisation des boues activées » VEOLIA STI (solution et technologie industrie), Plessis Robinson.

Stage technique (3 mois) : « Etude et suivi d'un digesteur anaérobie à lit fixe semi-industriel pour le traitement d'effluents d'abattoirs ». Universidad de Burgos, Espagne

2005 Maîtrise IUP (Institut Université professionnel) Génie des Systèmes Industriels - Université de Perpignan

Stage fin étude (6 mois) : « Traitement thermo-enzymatiques des boues d'épuration » Laboratoire LISBP INSA Toulouse. *Etudes pilotes laboratoires boues activées et fermenteurs*

2001 DEUG 1ere Année Mathématiques et Informatiques appliquées aux Sciences- Université de Perpignan

2. Activités de recherche

Depuis l'obtention de mon diplôme d'ingénieur et dans le cadre de mes activités professionnelles en tant qu'ingénieur de recherche puis chercheur, j'ai développé et consolidé trois expertises majeures, schématisées par la Figure 1 ci-après, en (i) caractérisation de la matière, en génie des procédés (notamment des procédés biologiques de traitement puis valorisation des résidus organiques) pour (ii) modéliser les processus biologiques et à la fois prédire les performances de ces procédés et d'optimiser les filières de valorisation de ces derniers, tant au niveau production de molécules d'intérêt (production d'énergie via la méthanisation par exemple) que leur réutilisation en agronomie en tant que fertilisants organiques (digestats, composts,...). Ces trois expertises interagissent entre elles (i.e. la caractérisation alimente les variables des modèles et aide au suivi des procédés ; la modélisation utilise les données du procédé et en retour peut aider à son pilotage) afin d'être mises au service de l'optimisation des bioprocédés de traitement de tous types de résidus (i.e. urbains, agricoles, agro-alimentaires, liquides ou solides).

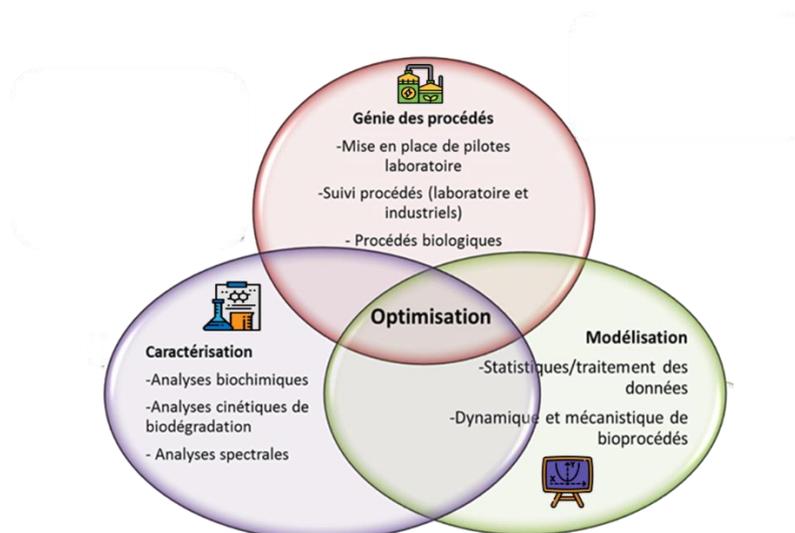


Figure 1 : Expertises développées tout au long de ma carrière professionnelle au sein de la recherche

Ces expertises sont également nécessaires pour répondre à ma thématique de recherche dont j'ai la responsabilité et que je développe depuis 2015 à INRAE autour de « l'adaptation et intégration des bioprocédés de traitement des résidus organiques pour une gestion durable des agrosystèmes », en adéquation avec les objectifs scientifiques INRAE. En effet, lors du traitement et de la valorisation des résidus organiques, les produits résiduels organiques générés doivent répondre à des critères de qualité agronomique incluant efficacité et innocuité (environnementale et sanitaire). Il est donc obligatoire de concevoir les bioprocédés en fonction des antagonismes entre les services attendus (i.e. dimensions agronomique et écosystémique, traitement de la pollution, et production d'énergie et/ou de molécules plateformes) à la recherche d'un compromis. Trouver un compromis entre valorisation agronomique et énergétique, entre autres services rendus, passe par la modélisation et le contrôle des procédés de traitement des résidus organiques afin de mieux concevoir ces derniers, de les adapter aux besoins en aval et de repenser à des filières innovantes. La connaissance de la qualité des résidus et produits résiduels organiques est primordiale pour la modélisation des procédés mais aussi pour prédire leur qualité avant retour vers les agrosystèmes (i.e. sols, plantes) et environnement (i.e. eau, air) et ainsi pouvoir utiliser ces critères en tant qu'objectifs dans l'optimisation et le contrôle des procédés de traitements. Ces critères de qualité dépendent des agrosystèmes et environnements ciblés, des plantes cultivées, notamment en termes d'interactions entre les cycles biogéochimiques du carbone (C), de l'azote (N), du phosphore (P) et d'autres éléments primordiaux, enjeu majeur au sein du département AgroEcoSystem d'INRAE.

La suite de ce chapitre décrit succinctement les activités de recherche réalisées que ce soit lors de mon stage de MASTER, mon emploi à VERI, ma thèse de doctorat et les projets de recherche auxquels j'ai participé depuis 2007. Puis, un tableau récapitulatif décrit les encadrements de doctorants, stages Master, et ingénieurs/post-doctorats que j'ai réalisés.

Stage, doctorat et post-doctorat

Stage de fin d'études ingénieure en génie des procédés

Caractérisation d'effluents agro-alimentaires et modélisation des boues activées (février-juin 2007)

INSA Toulouse, Génie des Procédés

VEOLIA STI (Solution et Technologie Industrie), Plessis Robinson

Collaborations : LISBP (INSA Toulouse)

Mots clés : boues activées, eaux usées industrielles, modélisation, ASM, caractérisation

L'objectif de mon stage était de prendre en main un outil de modélisation et simulation des processus biologiques d'une boue activée traitant des eaux usées (GPSX), calé et validé pour des eaux usées urbaines et de le caler et le valider sur des eaux usées industrielles. Cela a été réalisé avec les données d'une usine de traitement des eaux usées agroalimentaires située à Sablé sur Sarthe. J'ai pu (i) mettre en place une campagne de prélèvements et d'analyses et de récupération du suivi de la boue activée de l'usine, (ii) réaliser des tests en laboratoires afin de déterminer certains paramètres nécessaires à la modélisation de la boue activée et (iii) me former, caler puis valider le modèle de boues activées ASM1 (Activated Sludge Model n°1)¹ sur la boue activée de l'usine. ***Cette expérience a été la base de ma formation en modélisation des processus biologiques d'un procédé de traitement ainsi que la base de mes connaissances en définition et caractérisation de la matière organique.***

¹ IWA Task group on mathematical modelling for design and operation of biologic wastewater treatment (1987). *Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d, ASM3*, Scientific and technical Report.

Expérience professionnelle en tant qu'ingénieur de recherche à VERI

Ingénieure de Recherche en modélisation des procédés biologiques de traitement des eaux usées (2007-2013)

VERI, Veolia Recherche et Innovations, Maisons Laffitte

Collaborations : VEOLIA, INRAE-LBE, ENVOLURE, Ecole Polytechnique de Lausanne (Suisse)KWB (Berlin, Allemagne), VITO (Belgique), TTX (Italy), Berlin University of Technology (Allemagne), UNSW (Australie), VERI (France), Aquafin (Belgique), A3 (Allemagne), Polymem (France), Inge (Allemagne), Envi-Pur (République Tchèque)

Mots clés : *eaux usées, station d'épuration, boues activées, bioréacteur à membranes, modélisation, procédés biologiques, méthanisation, ASM1, ADM1, caractérisation, respirométrie, boues*

Dans le cadre de mon expérience d'ingénieur de recherche à VERI, j'ai démarré ma carrière en participant au projet Européen AMEDEUS (projet et participation décrits ci-après) sur la modélisation des processus biologiques des bioréacteurs à membranes (MBR) via un modèle modifié type ASM1 pour traiter des eaux usées urbaines. Cela a donné lieu à des productions scientifiques variées (deux publications et deux conférences internationales). Une des publications a notamment été réalisée via un groupe de travail international sur la modélisation des MBR, formé lors des comités de pilotage du projet. En parallèle, j'ai adapté et mis en place des protocoles de caractérisation de la matière et de détermination expérimentale de paramètres utilisés dans la modélisation des procédés de traitement des boues activées qui ont servi à caractériser puis modéliser le traitement d'un large panel d'eaux usées industrielles auprès de la direction technique de VEOLIA.

Enfin, j'ai été en charge du développement de la modélisation du procédé de digestion anaérobie des boues issues de station d'épuration (STEP) puis de la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM) impliquant la mise en place de pilotes laboratoires, des suivis analytiques, des caractérisations de la matière organique. Une partie des travaux sur la caractérisation de la matière organique pour la modélisation de la digestion anaérobie des boues a été réalisée via une thèse de doctorat entre 2009 et 2012 décrite ci-après.

Doctorat

Caractérisation de la matière organique par spectrofluorimétrie 3D pour la modélisation de la digestion anaérobie des boues issues de stations d'épuration (2009-2012)

VERI, Maisons Laffitte et INRAE-LBE

Université de Montpellier, Génie des procédés

Collaborations : VERI, Maisons Laffitte et INRAE LBE

Mots clés : *caractérisation, matière organique, bioaccessibilité, méthanisation, modélisation, fluorescence 3D, fractionnement, ADM1*

Afin d'optimiser aussi bien le procédé de digestion anaérobie que la filière complète du traitement des eaux usées, la caractérisation de la matière organique entrante est cruciale afin de contrôler son devenir dans le procédé, notamment grâce à la modélisation. Pour cela une collaboration entre VERI et le laboratoire INRAE LBE a été mise en place et a conduit à une thèse que j'ai réalisée dans le cadre de mes activités d'ingénieur de recherche à VERI en parallèle de mes autres tâches. L'objectif de ma thèse était de développer et d'appliquer une nouvelle méthode de caractérisation de la matière pour faciliter et améliorer la modélisation des processus biologiques se produisant lors de la méthanisation des boues issues STEP. Plus particulièrement, la question de recherche portait sur la notion de bioaccessibilité et de biodégradabilité de la matière organique et comment la décrire puis y associer des indicateurs expérimentaux. C'est ainsi que j'ai développé une nouvelle méthode de caractérisation

combinant un fractionnement de la matière organique, basée sur la caractérisation des exopolymères des boues d'épuration, et une analyse spectrale des fractions extraites par fluorimétrie 3D afin de prédire leur biodégradabilité anaérobie. Cette méthodologie a été appliquée et validée via des expérimentations et grâce à la modélisation en utilisant puis modifiant le modèle ADM1 (Anaerobic Digestion Model n°1²). Enfin, une analyse de scénarios utilisant le modèle a aussi montré que grâce à la prédiction de la bioaccessibilité et de la biodégradabilité, il était possible d'optimiser le design du procédé. Cela a ouvert des perspectives significatives quant à l'utilisation et l'adaptation de cette méthodologie à d'autres résidus organiques et procédés et à l'élaboration de capteurs et d'indicateurs. Les résultats de ces travaux ont été notamment valorisés par des publications scientifiques, [JJ26], [JJ27], [JJ28], [JJ29] et par des participations à des conférences [PO34], [PO35].

Post-Doctorat

Caractérisation de résidus organiques et Modélisation des processus biologiques d'une filière de traitement de ces résidus (2013-2015)

INRAE-LBE

Collaborations : INRAE ECOSYS, INERIS, INRAE OPAALE (ex-IRSTEA), LDAR, Arvalis, INRAE SAS, Esitpa Rouen, CIRAD Recyclages et Risques, Rittmo Agroenvironnement, Chambre d'Agriculture de Bretagne

Mots clés : *caractérisation, matière organique, méthanisation, compostage, modélisation, fractionnement, ADM1, micropolluants organiques, sol, digestats, fertilisants organiques*

Désireuse de revenir à la recherche académique, j'ai quitté mon poste d'ingénieure de recherche chez VERI pour réaliser un post-doctorat à INRAE LBE. Mon post-doctorat s'est déroulé dans le cadre du projet RISQ-PRO dont l'objectif était de modéliser les procédés d'une filière de traitement des boues (méthanisation et compostage) afin de prédire le devenir à la fois de la matière organique des résidus organiques et de certains micropolluants organiques adsorbés sur la matière. L'idée était de proposer des préconisations et des scénarios sur leur devenir après la valorisation agronomique potentielle des digestats et/ou composts de digestats issus de la filière. La question de recherche sous-jacente a été notamment de coupler les modèles des procédés jusqu'au sol. Pour ce faire, la méthodologie développée pendant mon doctorat a été utilisée et modifiée afin de définir un indicateur de bioaccessibilité de la matière organique pouvant être utilisée à la fois pour étudier la biodégradabilité de cette dernière dans les procédés mais également dans les sols agricoles. Tous ces aspects sont décrits de manière détaillée dans le Chapitre 2. Des publications [JJ24], [JJ25] et des participations à des conférences ont été réalisées [PO29], [PO30], [PO31], [PO32], [PO33], [Poster_5], [Poster_6], [Poster_7].

Projets de Recherche

Les contrats auxquels j'ai participé en tant que porteuse de projet ou contributrice sont décrits ci-dessous (les partenaires porteurs de projet sont soulignés).

AMEDEUS: *Accelerate Membrane Development for Urban Sewage Purification* (2005-2009).
Contributrice

Financement : Europe (5 205 k€) ; **Partenaires :** KWB (Berlin, Allemagne), VITO (Belgique), TTX (Italy), Berlin University of Technology (Allemagne), UNSW (Australie), VERI (France), Aquafin (Belgique), A3 (Allemagne), Polymem (France), Inge (Allemagne), Envi-Pur (République Tchèque).

² Batstone, D. J., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, S. V., Pavlostathis, S. G., Rozzi, A., Sanders, W. T. M., Siegrist, H., Vavilin, V.A. (2002) Anaerobic Digestion Model No.1. (ADM1). IWA Scientific and Technical Report No. 13. IWA, ISBN:1-900222-78-7.

RISQ-PRO : *Evaluation et réduction des risques de contamination par des polluants organiques dans le contexte de l'usage de Produits Résiduaire Organiques (PRO) sur sols agricoles (2013-2015).*

Contributrice

Financement : ONEMA (432 k€) ; **Partenaires** : INRAE LBE, INRAE ECOSYS, INERIS

ETYC : *Evaluation intégrée des phases de Traitement et de recyclage agricole des matières organiques pour des systèmes d'élevage moteurs dans l'atténuation du changement Climatique (2012-2015).*

Contributrice

Financement : ADEME (486 k€) ; **Partenaires** : UMR INRAE/AgroCampus-Ouest, INRAE OPAALE (ex-IRSTEA), INRAE ECOSYS, Chambre d'agriculture de Bretagne, INRAE LBE

PROBIOTIC : *Dynamique des pathogènes lors du stockage et de l'épandage des Produits Résiduaire Organiques : influence des déterminants biotiques et de la biodisponibilité de la matière organique (2013-2016).* **Contributrice**

Financement : ADEME (249 k€) ; **Partenaires** : INRAE-LBE, INRAE OPAALE (ex-IRSTEA)

PROLAB (financé par l'ADEME-DOSTE) : *Protocole de caractérisation des PROs au laboratoire pour prédire leur devenir au champ (2013-2016).* **Contributrice**

Financement : ADEME (637 k€) ; **Partenaires** : INRAE ECOSYS, LDAR, Arvalis, INRAE LBE, INRAE SAS, Esitpa Rouen, CIRAD Recyclages et Risques, Rittmo Agroenvironnement

IBRA : *Integral Biorefinery of the Rapeseed Meal-Bioraffinerie intégrale et durable du tourteau de colza (2017-2018).* **Contributrice et responsable d'une tâche**

Financement : 3BCAR Inter-Carnot (275 k€) ; **Partenaires** : LISA, LRGP, INRAE LBE (3BCar)

BiogasMena: *Demonstration of dry fermentation and optimization of biogas technology for rural communities in the MENA region (2017-2020).* **Contributrice et responsable du work package sur la valorisation des digestats**

Financement : ERANETMED (1 349k€) ; **Partenaires** : University of Hohenheim (Allemagne), University of Verona (Italie), Agricultural University of Athens (AUA, Grèce), Université des Sciences et Technologies d'Oran (Algérie), INRAE LBE (France), IMDEA (Espagne), Centre de Biotechnologie de Sfax (Tunisie), Nenufar (France), ERM (France), FnBB e. V. (Allemagne), University of Cairo (Egypt)

MAPPED : *Outils de pilotage d'unité de méthanisation à l'échelle du territoire (2017-2020).*

Contributrice

Financement : ADEME (3 780 k€) ; **Partenaires** : BioEnTech, INRAE LBE, INRAE OPAALE, INRAE ECOSYS, Akajoule, ENGIE

PROLEG : *Intensification écologique des systèmes de culture via le recyclage des produits résiduaire et les légumineuses pour améliorer les services écosystémiques rendus pour et par les systèmes de culture (2016-2020).* **Contributrice**

Financement : PSDR (300 k€) ; **Partenaires** : INRAE ECOSYS, INRAE Agronomie, INRAE LBE, Association Patrimoniale de la Plaine de Versailles et du Plateau des Alluets, Terre et Cités, Chambre d'agriculture Interdépartementale d'Ile de France, Terres Inovia, Syndicat mixte d'assainissement de la région ouest de Versailles, Versailles Grand Parc, Bio Yvelines Services

I-MO-POL-DYN : *Interactions micropolluants/matrices organiques au sein des matières fertilisantes d'origine résiduaire : influence sur la dynamique des micropolluants après retour au sol de ces matières (2016-2019).* **Contributrice**

Financement : ADEME (237 k€), **Partenaires** : Univ. Limoges, INRAE LBE, IC2M CNRS

MADSLUDGE : *Optimisation de la filière de traitement des boues pour limiter la dissémination de l'antibiorésistance* (2018-2020). **Constitutrice**

Financement : ADEME/ANSES (163 k€) ; **Partenaires** : INRAE LBE, INTHERES, Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement (ENSAT)

DIGESTATE : *Diagnostic des traitements des déchets et comportement des contaminants dans l'environnement* (2015-2020). **Constitutrice**

Financement : ANR (691 k€)

Partenaires : CIRAD Unité Recyclage et risque, INRAE ECOSYS, INRAE LBE, CNRS-CEREGE, INRAE EMMAH, LEM

Nut-PRO-Plant: Nutrients accessibility of organic residues from wastes (2017). **Porteuse de projet**

Financement: Agreenskills; Agropolis Fondation, Labex Agro (71 k€); **Partenaires**: INRAE LBE, Department of Agricultural Sciences (DipSA) – Alma Mater Studiorum University of Bologna (Italy)

Concept-Dig : Outil d'aide à la conception de filière pour la valorisation agronomique des digestats, (2016-2019). **Porteuse de projet**

Financement : ADEME (432 k€) ; **Partenaires** : INRAE LBE, IRSTEA OPAALE, INRAE ECOSYS, CIRAD BioWooEB, Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France (AAMF)

IVA-WASTE: *Integrated VALORIZATION of liquid and solid WASTE* (2021). **Constitutrice**

Financement : Agropolis Fondation (25 k€) ; **Partenaires** : INRAE MISTEA, INRAE-LBE, CERTE (Tunisie), CIRAD Unité Recyclage et risques

BIOGAZ RIO : Recherche et Innovation en Occitanie (2020-2022). **Constitutrice et responsable du work package sur l'approche filière et valorisation des co-produits**

Financement : Subventions de la Région Occitanie et de Europe au titre du Programme Opérationnel FEDER-FSE Languedoc Roussillon (2 700k€) ; **Partenaires** : INRAE LBE, BioEnTech, Naskeo, SUEZ, Distillerie Sud Languedoc

COVAFU : *Développement d'une filière de collecte et de valorisation du fumier de cheval à des fins agronomiques* (2021). **Constitutrice**

Financement : Région Occitanie ; **Partenaires** : Comité Départemental d'Equitation (CDE), INRAE LBE, plateforme de compostage Aspiran

Compostage_Lallemand : *Optimisation du compostage de fumier équin* (2021-2022). **Porteuse de projet**

Financement : LALLEMAND (23.6 k€) ; **Partenaires** : INRAE LBE, LALLEMAND, Comité Départemental d'Equitation 34

Ferti-Dig : Outil d'aide à la conception de filière pour la valorisation agronomique des digestats, (2021-2024). **Porteuse de projet**

Financement : ADEME (644 k€)

Financement : GRDF (60 k€)

Partenaires : INRAE LBE, Chambre d'Agriculture de Bretagne (CRAB), Chambre d'Agriculture du Grand-Est (CRAGE), INRAE ECOSYS, INRAE SAS, INRAE EMMAH, SOLAGRO, ACTA, AAMF, LDAR, EPLEFPA - Bas Rhin (Obernai), Agro de la Meuse (Bar-le-Duc)

Encadrements de la recherche

L'ensemble des personnes encadrées ou co-encadrées sont listées dans le tableau suivant (trois thèses dont une soutenue, douze stages Master, un stage doctoral, un ingénieur, un post-doctorat et un assistant ingénieur).

Doctorats	
2016-2019	<p>Felipe Guilayn, SUPAGRO Montpellier (Génie des Procédés), Ecole doctorale GAIA (Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau), Université de Montpellier <i>Digestats de méthanisation : Caractérisation et nouvelles voies de valorisation</i></p> <p>Financement : Thèse CIFRE INRAE-SUEZ Directeur de thèse : Dominique Patureau (INRAE, LBE Narbonne) Encadrement : Julie Jimenez (INRAE, LBE Narbonne), Marion Crest (CIRSEE, SUEZ), Maxime Rouez (CIRSEE, SUEZ) Collaboration : INRAE LBE, SUEZ, Université de Limoges (Geneviève Feuillade) Articles acceptés : [JJ09][JJ11][JJ12][JJ13] , conférences : [PO12][PO13][PO15][PO17][PO20] [PO21][PO22][PO23] [Poster_1]</p>
2020-2023	<p>David Fernandez-Dominguez, SUPAGRO Montpellier (Génie des Procédés), Ecole doctorale GAIA, Université de Montpellier <i>Characterization, modelling and control of organic matter fate during anaerobic digestion: towards digestates use improvement for agriculture SUPAGRO</i></p> <p>Montpellier (Génie des Procédés) Ecole doctorale GAIA, Université de Montpellier Financement : Région et département Agroécosystème (INRAE) Directeur de thèse : Dominique Patureau (INRAE, LBE) Encadrement : Julie Jimenez (INRAE, LBE) Collaboration: séjour au Department of Thematic Studies-Environmental Change and Biogas Research Center, Linköping University, Sweden (Sepher Yecta) Articles acceptés : [JJ01][JJ04] , Articles soumis : [36], conférences : [PO5][PO6][PO8]</p>
2020-2023	<p>Margaud Pereme, SUPAGRO Montpellier (Génie des Procédés), Ecole doctorale GAIA, Université de Montpellier <i>Optimisation multi-objectif pour l'éco-conception d'une filière de valorisation des résidus organiques via la méthanisation</i></p> <p>Financement : école doctorale GAIA, Université de Montpellier Directeurs de thèse : Jean-Phillippe Steyer et Julie Jimenez (INRAE, LBE) Articles soumis : [35] , conférences : [PO4], [PO9]</p>
Masters	
avril-septembre 2008	<p>Rémi Lestienne, ENSIACET, Génie Chimique <i>Modélisation de la digestion anaérobie</i> VERI</p>
avril – septembre 2010	<p>Cécile Denis, Master 2 Université Paris 11, Instrumentation et Méthodes d'Analyse Moléculaire <i>Caractérisation de la matière organique au cours du traitement des eaux usées : comparaison analyses globales/analyses moléculaires</i> VERI Co-auteur d'un article publié [JJ29]</p>

aout 2014- février 2015	Han Lei, Master 2 ParisTech Science et Technologie de l'Environnement, Gestion et Traitement des Eaux, des Sols et des Déchets <i>Lien entre caractérisation des produits résiduaux organiques et stabilité de la matière organique lors de tests d'incubation sur sol agricole (projets RISQ-PRO et ETYC)</i> INRAE-LBE <i>Co-auteur d'un article publié [JJ18]</i>
avril-septembre 2015	Camilla Espinoza Carvajal, Master 2, Pontificia Universidad Catolica de Valparaiso, Escuela de Ingenieria Bioquimica, Chile <i>Assessment of the bioaccessibility and biodegradability of organic matter to describe anaerobic digestion process through mathematical modeling</i> INRAE-LBE <i>Co-auteur d'une conférence internationale [PO31]</i>
février-juillet 2016	Ziren Yu, Université Technologique de Compiègne <i>Evaluation de l'impact de la préparation d'échantillons sur les analyses de caractérisation des Produits Résiduaux Organiques (projet PROLAB)</i> INRAE-LBE
mars-aout 2017	Paolo De Toledo Carrenho, Master 2, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier/ SUPAGRO Montpellier <i>Récupération de substances humiques à partir des digestats de méthanisation (Thèse Felipe Guilayn)</i> INRAE LBE/SUEZ
Mars-sept 2017	Bastien Zennaro, SUPAGRO Montpellier <i>Study of the limits of near infrared spectroscopy for the prediction of the biomethane potential of wet organic substrates</i> INRAE LBE
mars- septembre 2018	Ségolène Fremont, Ecole de Biologie Industrielle Cergy <i>Valoriser et concentrer la valeur fertilisante du digestat de méthanisation par séchage thermique en minimisant les pertes de nutriments notamment les pertes d'azote</i> INRAE LBE/SUEZ
mars –aout 2019	Claire Calmette, Master 2 DTEC-Bio, Université de Montpellier 2 <i>Caractérisation des digestats de méthanisation agricole : vers une meilleure gestion de leur valorisation agronomique (projet Concept-Dig)</i> INRAE-LBE
2019	Matthijs Somers, Department of Chemical Engineering KU Leuven (Belgique), stage doctoral <i>Implementation of digestate treatment and recirculation: influence on the anaerobic digestion</i> Financement: Research Foundation - Flanders (FWO) Directeur de thèse : Lise Appels Encadrement durant un séjour au LBE en 2019 <i>Article en commun [JJ06]</i>
avril-septembre 2020	Omar Cherad, <i>Modélisation et contrôle de la digestion anaérobie des boues : application sur un cas industriel</i> INRAE LBE/SIAAP
avril-septembre 2021	Tom Iche-Puig, Ecole d'ingénieur PURPAN Toulouse <i>Etude de la transformation du fumier équin héraultais par le compostage en vue d'une valorisation en viticulture (projet COVAFU)</i> INRAE-LBE/CDE 34

mars- septembre 2021	Jeanne Bouvard, Master 2 Gestion des Territoires et développement local, Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier, Université Paul Valéry de Montpellier III <i>Diagnostic agricole et agronomique du potentiel de la fertilisation circulaire en oléiculture tunisienne (projet IVA-WASTE)</i> INRAE LBE, CIRAD Recyclages et risques, CERTE (Tunisie)
septembre 2021- février 2022	Nicolas Bourdin, Mastère spécialisé Génie des procédés biotechnologiques CPE Lyon et ENSIC Nancy <i>Valorisation des digestats de méthanisation : montée en échelle de concept innovant (projet Biogaz-RIO)</i> INRAE LBE, SUEZ
Post-doctorats, Ingénieurs, Assistant-ingénieurs	
2017-2019	Bastien Zennaro, Ingénieur SUPAGRO Montpellier <i>Caractérisation des résidus organiques et des digestats pour la modélisation de leur méthanisation afin de prédire production de méthane et la qualité agronomique des digestats (projet MAPPED)</i> INRAE LBE, INRAE ECOSYS, INRAE OPAALE, BIOENTECH, ENGIE, Akajoule
2016-2018	Quentin Aemig, post-doctorat <i>Interactions micropolluants/matrices organiques au sein des matières fertilisantes d'origine résiduaire : influence sur la dynamique des micropolluants après retour au sol de ces matières (projet I-MO-POL-DYN)</i> INRAE LBE, ENSIL
2019-2022	Lucie Sauvadet, assistant ingénieur <i>Valorisation des effluents de distillerie pour une meilleure gestion agronomique des co-produits (projet Biogaz-RIO)</i> INRAE LBE, Distillerie Sud Languedoc
Mars-décembre 2022	Nicolas Bourdin, Ingénieur CPE Lyon <i>Valorisation des digestats de méthanisation : montée en échelle de concept innovant (projet Biogaz-RIO)</i> INRAE LBE, SUEZ
Autres encadrements de stage	
2008-2009	Estelle Gonidec, Licence Pro (alternance) Procédés de Traitements et de Valorisation des Rejets, IUT Pontivy, VERI
2014	Nicolas Doussiet, Master 1 DTEC-Bio, Université de Montpellier 2, projet RISQ-PRO, INRAE LBE
2017	Albane Loménède, Master 1, UTC Compiègne, projet IBRA, INRAE LBE
2017	Axelle Herbette, Master 1, UTC Compiègne, projet Concept-Dig, INRAE LBE Anne Wallrich, Master 1, Ecole UniLaSalle, Rouen, projet Concept-Dig, INRAE LBE, INRAE ECOSYS, TRAME
2018	David Fernandez-Dominguez, Master 1 Environmental Engineering University of Barcelona Spain, projet Concept-Dig, INRAE LBE
2019	Noémie Lakehal, Master 1, UTC Compiègne, projet Concept-Dig, INRAE LBE
2020	Solène Vaudron, Master 1, UTC Compiègne, projet BIOGAS-MENA, INRAE LBE
2021	Chloé Hanania, Master 1, UTC Compiègne, projet FertiDig, INRAE LBE Clémentine Londero, Master 1, UTC Compiègne, INRAE LBE, LALLEMAND
2022	Louise Thomas (IUT Génie Chimique Génie des Procédés Narbonne), projet FertiDig, INRAE LBE Thomas Lacombe (IUT Génie Chimique Génie des Procédés Narbonne), projet Biogaz-RIO, INRAE LBE

3. Principales collaborations

Tout au long de ma carrière et grâce à ma participation dans 18 projets principaux dont 3 que j'ai coordonnés complètement, j'ai collaboré avec divers acteurs au sein de mon unité, au sein de l'INRAE et à l'extérieur de l'INRAE, que ce soient partenaires publics ou privés et acteurs de la filière de valorisation des résidus organiques de manière générale. Ainsi, le tableau suivant présente l'ensemble des collaborations que j'ai eues depuis mon doctorat.

Collaborations INRAE	Collaborations avec les instituts publics/associations et collectivités	Collaborations avec des partenaires privés
ECOSYS Grignon	Nationales :	VEOLIA (VERI)
OPAAL Rennes	AAMF (Association des Agriculteurs	SUEZ
SAS Rennes	Méthaniseurs de France)	GRDF
EMMAH Avignon	ENSIL Limoges	ENGIE
FARE Reims	CIRAD BIOWOOEB	BIOENTECH
MISTEA Montpellier	CIRAD Recyclages et risques	Distillerie Sud Languedoc
ITAP Montpellier	ECOLAB INSA Toulouse	LALLEMAND
	Université de Lorraine	RITTMO
	EPLEFPA (Obernai, Bar le duc)	LDAR
	SIAAP	
	Internationales :	
	Université de Laval (Canada)	
	AUA (Grèce)	
	IMDEA (Espagne)	
	University of Honenheim (Allemagne)	
	University of Bologna (Italie)	
	University of Verona (Italy)	
	KU Leuven (Belgique)	
	EGE University (Turquie)	
	CBS (Centre de Biotechnologie de Sfax, Tunisie)	
	Nireas-IWRC (University of Cyprus)	
	CERTE (Tunisie)	
	University of Cairo (Egypt)	

4. Expertises et participation à des comités et jurys de thèse

Expertises

J'ai réalisé des expertises de projets et de rapports scientifiques dans les cas suivants :

- Expertises des rapports rédigés dans le cadre du Comité Stratégique de Filière (CSF), Axe Méthanisation Action « Externalité » (2020) en tant que membre du conseil scientifique du CSF (groupes de travail : Gaz à effet de serre, Déchets, Qualité de l'eau, Résilience des exploitations)
- Expertises de projets ADEME (appels à projets GRAINE et PIA)

Je suis également reviewer d'articles pour les revues suivantes : *Bioresource Technology*, *Waste Management*, *Water Research*, *Waste and Biomass Valorization*, *Environmental Science and Pollution Research*, *Soil and Tillage Research*, *Frontiers in Environmental Science*.

Participation aux comités de thèse

Dans le cadre d'autres activités de recherche, j'ai participé aux comités de thèse des doctorants suivants :

Daniela-Alejandra Mora-Salguero (2021-2024), *Impact des digestats de méthanisation sur la qualité microbiologique des sols agricoles*, INRAE Dijon

Joshua Cooke (2020-2023), *Etude et prédiction de l'impact des paramètres de digestion anaérobie sur la composition carbonée des digestats et leur effet sur la stabilité structurale des sols*, INRAE OPAALE et SAS

Victor Moinard (2017-2021), *Conséquences de l'introduction de la méthanisation dans une exploitation de polyculture-élevage sur les cycles du carbone et de l'azote. Combinaison de l'expérimentation et de la modélisation à l'échelle de la ferme*, INRAE ECOSYS, CIRAD-ISTOM

Robin Beghin (2017-2020), *Etude des conséquences de la digestion anaérobie du maïs sur ses caractéristiques amendantes: devenir des matières organiques, stockage du carbone, vie microbienne, capacité d'adsorption et stabilité structurale de l'horizon de surface de Luvisols cultivés*, Ecole Purpan Toulouse

Alexandre Mallet (2018-2021), *Caractérisation spectroscopique robuste des déchets organiques: comment s'affranchir des effets de l'eau*, INRAE, BIOENTECH

Younes Bareha (2015-2018), *Modélisation des processus de transformation de l'azote en digestion anaérobie: application à l'optimisation de la valorisation des digestats*, INRAE OPAALE

Afifi Bin Akhbar (2014-2017), *Caractérisation de la fraction liquide des digestats issus de la codigestion de résidus solides*, INRAE LBE

Cyrille Charnier (2013-2016), *Fast characterization of the organic matter, instrumentation and modelling for the anaerobic digestion process performances prediction*, INRAE, BIOENTECH

Quentin Aemig (2012-2015), *Dynamique des micropolluants organiques au cours du traitement biologique de résidus solides : lien entre caractérisation du résidu, localisation des micropolluants organiques au sein des compartiments du résidu (sorption, biodégradation)*, INRAE LBE

Sophie Descremps (2012-2015), *Caractérisation du résidu particulaire et étude des mécanismes limitant la biodégradation des boues d'épuration*, LISBP INSA Toulouse

Participation à des jurys de thèse

J'ai également participé à quatre jurys de thèses, deux nationaux en tant qu'examinateur et deux internationaux en tant que rapporteur.

- Examinatrice dans le jury de thèse de Maël Mercier-Huat (2021) « Développement et validation d'un bioprocédé à l'échelle pilote de valorisation de biomasses conchylicoles par digestion anaérobie bi-étagée ou fermentation acidogène », Université de technologie de Compiègne
- Examinatrice dans le jury de thèse de Fida Mrad (2018) « Décomposition de résidus de culture et de matériaux biosourcés : impact sur les communautés microbiennes des sols agricoles et les fonctions associées », Université de Rouen-UniLaSalle, spécialité sciences agronomiques, biotechnologies agro-alimentaires
- Examinateur/Rapporteur dans le jury de thèse de Juan Cubero Cardoso (2021) « Valorization of residual strawberry extrudate through obtaining high added value compounds and methane production by anaerobic digestion », Universidad de Huelva (Espagne)

- Examineur/Rapporteur dans le jury de thèse de Mercedes Llamas Redondo (2021) « Microalgae biomass valorization for volatile fatty acids, microbial oils and biogas production in a biorefinery context », Universidad Computense de Madrid (Espagne)

5. Activités pédagogiques et administratives

Contribution aux enseignements

Dans le cadre du Master SPA2E (Sciences et Procédés des Agroressources pour l'Alimentation et l'Environnement) de l'Université de Montpellier, participation dans l'UE « Gestion intégrée des sous-produits et co-produits de l'agro-industrie », je donne un cours magistral de 4h30 sur la « Valorisation des digestats de méthanisation » que j'ai mis en place en 2017 et reconduit chaque année depuis.

Je participe également à la formation « Modélisation et croissance microbienne » pour l'école doctorale GAIA de l'Université de Montpellier, cours/TD de 4h sur la modélisation des bioprocédés de traitement des résidus organiques, reconduite chaque année depuis 2015 avec mon collègue Eric Latrille (INRAE LBE).

Activités collectives au sein de l'unité

Depuis début 2019, je suis en charge de deux groupes de travail au sein de la démarche qualité du LBE. Le premier est la co-animation du groupe de travail « gestion de projets ». Dans ce cadre, des solutions et propositions d'amélioration et d'outils sont recherchées afin d'améliorer la traçabilité des projets ainsi que leur gestion. Via ce groupe de travail, j'ai suivi une formation pour devenir référente LBE de la méthode EUREQUA, méthode d'aide à la gestion et conduite de projet. Le second groupe de travail que je co-anime est celui de la « gestion des équipements » où l'objectif est d'améliorer la traçabilité des divers équipements utilisés au laboratoire ainsi que leur bonne utilisation.

Activités d'animations

Depuis 2020, je co-anime un groupe de travail sur la Matière Organique (GT MO) au sein du Bureau de Normalisation Fertilisation (BNFERTI) avec Fiona Ehrhardt (RITTMO). L'objectif de ce groupe de travail est de réunir divers acteurs (laboratoires, instituts publics, privés, industriels) autour de la thématique de caractérisation de la matière organique afin de mettre en place et/ou améliorer des méthodes de caractérisation selon les besoins identifiés (ex : indice de stabilité de la matière organique dans les sols, carbone organique labile, biodégradabilité, etc...) et de générer des modifications ou de nouvelles méthodes normalisées.

Participation à des réseaux thématiques

Depuis 2015, je participe à des réseaux thématiques comme listés ci-après :

- Réseaux RMT COMIFER Bouclage des cycles ;
- Groupe de travail Matière organique, Bureau de Normalisation Fertilisation (puis co-animatrice du groupe de travail GTMO depuis 2020);
- Membre de l'observatoire SOERE-PRO Système d'Observation et d'Expérimentation, sur le long terme, pour la recherche en environnement « Impacts environnementaux du recyclage de produits résiduels organiques sur les écosystèmes cultivés », participation au directoire scientifique et à l'assemblée générale (depuis 2018) ;
- Membre du réseau sur les matières organiques RESMO : participation aux workshops (2015 et 2018) ;
- Membre du conseil scientifique du Comité Stratégique de Filière (CSF), Axe Méthanisation, Action « Externalité » (2020) ;
- Membre du Conseil Scientifique de RITTMO (depuis 2019).

6. Production scientifique

Les noms soulignés sont les étudiants encadrés lors de la publication.

Production de connaissances originales, reconnues dans la/les communauté(s) scientifique(s) de référence

- [JJ01] David Fernández-Domínguez, Felipe Guilayn, Dominique Patureau, **Julie Jimenez** (2022). Characterising the stability of the organic matter during anaerobic digestion: a selective review on the major spectroscopic techniques. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, 21, 691-726, IF 14,284, <https://dx.doi.org/10.1007/s11157-022-09623-2>, <https://hal.inrae.fr/hal-03691866>
- [JJ02] Bastien Zennaro, Paul Marchand, Eric Latriille, Jeanne-Chantal Thoisy-Dur, Sabine Houot, Cyril Girardin, Jean-Philippe Steyer, Fabrice Béline, Cyrille Charnier, Charlotte Richard, Guillaume Accarion, **Julie Jimenez** (2022). Agronomic characterization of anaerobic digestates with near-infrared spectroscopy. *Journal of Environmental Management*, 317, 115393, IF 8,91, <https://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115393>, <https://hal.inrae.fr/hal-03709209>
- [JJ03] Ulysse Bremond, Aude Bertrandias, Raphaëlle de Buyer, Eric Latriille, **Julie Jimenez**, Renaud Escudié, Jean-Philippe Steyer, Nicolas Bernet, Hélène Carrère (2021). Recirculation of solid digestate to enhance energy efficiency of biogas plants: Strategies, conditions and impacts. *Energy Conversion and Management*, 231, 113759, IF 11,533, <https://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113759>, <https://hal.inrae.fr/hal-03192581>
- [JJ04] David Fernández-Domínguez, Dominique Patureau, Sabine Houot, Nicolas Sertillanges, Bastien Zennaro, **Julie Jimenez** (2021). Prediction of organic matter accessibility and complexity in anaerobic digestates. *Waste Management*, 136, 132-142, 8,816, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.004>, <https://hal.inrae.fr/hal-03473235>
- [JJ05] Roman Moscoviz, **Julie Jimenez** (2021). Improving anaerobic digestion mass balance calculations through stoichiometry and usual substrate characterization. *Bioresource Technology*, 337, 125402, IF 10,89, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125402>, <https://hal.inrae.fr/hal-03319269>
- [JJ06] Matthijs H Somers, **Julie Jimenez**, Samet Azman, Jean-Philippe Steyer, Jan Baeyens, Lise Appels (2021). Ultrasonication affects the bio-accessibility of primary dairy cow manure digestate for secondary post-digestion. *Fuel*, 291, 9, IF 6,609, <https://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120140>, <https://hal.inrae.fr/hal-03130716>
- [JJ07] **Julie Jimenez**, Marco Grigatti, Elisa Boanini, Dominique Patureau, Nicolas Bernet (2020). *The impact of biogas digestate typology on nutrient recovery for plant growth: Accessibility indicators for first fertilization prediction*. *Waste Management*, 117, 18-31, IF 8,816, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.052>, <https://hal.inrae.fr/hal-02921497>
- [JJ08] Ulysse Bremond, Aude Bertrandias, Denis Loisel, **Julie Jimenez**, Jean-Philippe Steyer, Nicolas Bernet, Hélène Carrère (2020). Assessment of fungal and thermo-alkaline post-treatments of solid digestate in a recirculation scheme to increase flexibility in feedstocks supply management of biogas plants. *Renewable Energy*, 149, 641-651, IF 8,634, <https://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.062>, <https://hal.inrae.fr/hal-02555213>
- [JJ09] Felipe Guilayn, M. Rouez, M. Crest, Dominique Patureau, **Julie Jimenez** (2020). *Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: a critical review*. *Reviews in Environmental Science*

and *Bio/technology*, IF 14,284, <https://dx.doi.org/10.1007/s11157-020-09531-3>, <https://hal.inrae.fr/hal-02571756>

[JJ10] **Julie Jimenez**, Cyrille Charnier, Mokhles Kouas, Eric Latrille, Michel Torrijos, Jérôme Harmand, Dominique Patureau, Mathieu Sperandio, Eberhard Morgenroth, Fabrice Béline, George Ekama, Peter Vanrolleghem, Ángel Robles, Aurora Seco, Damien Batstone, Jean-Philippe Steyer (2020-01). Modelling hydrolysis: Simultaneous versus sequential biodegradation of the hydrolysable fractions. *Waste Management*, 101 150-160, IF 8,816 <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.004>, <https://hal.insa-toulouse.fr/hal-02904361>

[JJ11] Felipe Guilayn, Mohamed Benbrahim, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau, **Julie Jimenez** (2020). Humic-like substances extracted from different digestates: First trials of lettuce biostimulation in hydroponic culture. *Waste Management*, 104 239-245, IF 8,816, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.025>, <https://hal.inrae.fr/hal-02627274>

[JJ12] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, Jean-Luc Martel, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau (2019). First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation. *Waste Management*, 86 67-79, IF 8,816, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.032>, <https://hal.inrae.fr/hal-02627223>

[JJ13] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau (2019b). *Digestate mechanical separation: Efficiency profiles based on anaerobic digestion feedstock and equipment choice*. *Bioresource Technology*, 274 180-189, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.090>, <https://hal.inrae.fr/hal-02627289>

[JJ14] Quentin Aemig, Nicolas Doussiet, Alice Danel, Nadine Delgenes, **Julie Jimenez**, Sabine Houot, Dominique Patureau (2019). Organic micropollutants' distribution within sludge organic matter fractions explains their dynamic during sewage sludge anaerobic digestion followed by composting. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 5820-5830, IF 3,056, <https://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-4014-7>, <https://hal.inrae.fr/hal-02629338>

[JJ15] Younes Bareha, Romain Girault, **Julie Jimenez**, Anne Trémier (2018). Characterization and prediction of organic nitrogen biodegradability during anaerobic digestion: A bioaccessibility approach. *Bioresource Technology*, 263, 425-436, IF 1089, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.085>, <https://hal.inrae.fr/hal-02940628>

[JJ16] Charlotte Rennuit, Jin Mi Triolo, Søren Eriksen, **Julie Jimenez**, Hélène Carrère, Sasha D. Hafner (2018). Comparison of pre- and inter-stage aerobic treatment of wastewater sludge: effects on biogas production and COD removal. *Bioresource Technology*, 247 332-339, IF 10,89, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.128>, <https://hal.inrae.fr/hal-02620984>

[JJ17] Anais Goulas, Marjolaine Deschamps, Sylvie Nelieu, **Julie Jimenez**, Dominique Patureau, Claire-Sophie Haudin, Pierre Benoit (2017). Development of a soft extraction method for sulfamethoxazole and transformation products from agricultural soils: Effects of organic matter co-extraction on the environmental availability assessment. *Science of the Total Environment*, 607-608 1037-1048, IF 10,753, <https://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.192>, <https://hal.inrae.fr/hal-01570306>

[JJ18] **Julie Jimenez**, Lei Han, Jean-Philippe Steyer, Sabine Houot, Dominique Patureau (2017). Methane production and fertilizing value of organic waste: organic matter characterization for a better prediction of valorization pathways. *Bioresource Technology*, 241 1012-1021, IF 10,89, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.176>, <https://hal.inrae.fr/hal-01543454>

- [JJ19] Cyrille Charnier, Eric Latrille, **Julie Jimenez**, Margaux Lemoine, Jean Claude Boulet, Jérémie Miroux, Jean-Philippe Steyer (2017). Fast characterization of solid organic waste content with near infrared spectroscopy in anaerobic digestion. *Waste Management*, 59 140-148, IF 8,816, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.029>, <https://hal.inrae.fr/hal-01605641>
- [JJ20] Géraldine Maynaud, Dominique Steyer, Céline Druilhe, Christine Ziebal, **Julie Jimenez**, Michel Torrijos, Anne Marie Pourcher, Nathalie Wéry (2017). Caractéristiques physico-chimiques et microbiologiques de digestats bruts et post-traités destinés à l'épandage agricole. *Techniques Sciences Méthodes*, (5), 33-50, <https://dx.doi.org/10.1051/tsm/201705033>, <https://hal.inrae.fr/hal-01605927>
- [JJ21] Géraldine Maynaud, Céline Druilhe, Mylène Daumoin, **Julie Jimenez**, Dominique Patureau, Michel Torrijos, Anne-Marie Pourcher, Nathalie Wéry (2017). Characterisation of the biodegradability of post-treated digestates via the chemical accessibility and complexity of organic matter. *Bioresource Technology*, 213 65–74, IF 10,89, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.057>, <https://hal.inrae.fr/hal-01606007>
- [JJ22] Cyrille Charnier, Eric Latrille, **Julie Jimenez**, Michel Torrijos, Philippe Sousbie, Jérémie Miroux, Jean-Philippe Steyer (2017). *Fast ADM1 implementation for the optimization of feeding strategy using near infrared spectroscopy*. *Water Research*, 122 27-35, IF 13,400, <https://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.051>, <https://hal.inrae.fr/hal-01603275>
- [JJ23] Quentin Aemig, Claire Cheron, Nadine Cathala-Delgenès, **Julie Jimenez**, Sabine Houot, Jean-Philippe Steyer, Dominique Patureau (2016). Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in sludge organic matter pools as a driving force of their fate during anaerobic digestion. *Waste Management*, 48 389-396, IF 8,816, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.045>, <https://hal.inrae.fr/hal-01533862>
- [JJ24] **Julie Jimenez**, Eric Latrille, Jérôme Harmand, Daniel Gaida, Christian Wolf, Francis Mairet, Olivier Bernard, Victor Alcaraz-Gonzalez, Hugo Mendez-Acosta, Daniel Zitomer, Dennis Totzke, Henri Spanjers, Fabian Jacobi, Alan Guwy, Richard Dinsdale, Sofiane Mazhegrane, Gonzalo Ruiz-Filippi, Aurora Seco, Thierry Ribeiro, André Pauss, Jean-Philippe Steyer (2015). Instrumentation and control of anaerobic digestion processes: a review and some research challenges. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, 14 615-648, IF 14,284, <https://dx.doi.org/10.1007/s11157-015-9382-6>, <https://hal.inria.fr/hal-01256735>
- [JJ25] **Julie Jimenez**, Quentin Aemig, Nicolas Doussiet, Jean-Philippe Steyer, Sabine Houot, Dominique Patureau (2015). A new organic matter fractionation methodology for organic wastes: Bioaccessibility and complexity characterization for treatment optimization. *Bioresource Technology*, 194 344-353, IF 10,89, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.037>, <https://hal.inrae.fr/hal-01535235>
- [JJ26] Mathieu Muller, **Julie Jimenez**, Maxime Antonini, Yves Dudal, Eric E. Latrille, Fabien Vedrenne, Jean-Philippe Steyer, Dominique Patureau (2014). Combining chemical sequential extractions with 3D fluorescence spectroscopy to characterize sludge organic matter. *Waste Management*, 34 (12), 2572-2580, IF 8,816, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.07.028>, <https://hal.inrae.fr/hal-02636065>
- [JJ27] **Julie Jimenez**, Estelle Gonidec, Jesus Cacho Rivero, Eric Latrille, Fabien Vedrenne, Jean-Philippe Steyer, (2014). Prediction of anaerobic biodegradability and bioaccessibility of municipal sludge by coupling sequential extractions with fluorescence spectroscopy: towards ADM1 variables. *Water Research* 50, 359-372, IF 13,400, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.048>
- [JJ28] Alexis Mottet, Ivan Ramirez, Hélène Carrère, Stéphane Déléris, Fabien Vedrenne, **Julie Jimenez**, Jean-Philippe Steyer (2013). New fractionation for a better bioaccessibility description of particulate

organic matter in a modified ADM1 model. *Chemical Engineering Journal*, 2013, vol. 228, p. 871-881, IF 13,273, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.05.082>

[JJ29] **Julie Jimenez**, Fabien Vedrenne, Cecile Denis, Alexis Mottet, Stéphane Déléris, Jean-Philippe Steyer, Jesus Andres Cacho Rivero (2013). A statistical comparison of protein and carbohydrate characterisation methodology applied on sewage sludge samples. *Water Research*, 47 (5), 1751 - 1762, IF 13,400, <https://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.052>, <https://hal.inrae.fr/hal-02647946>

[JJ30] Alessio Fenu, Giuseppe Guglielmi, **Julie Jimenez**, Mathieu Sperandio, Devendra Saroj, Boris Lesjean, Christoph Brepols, Chris Thoeve, Ingmar Nopens (2010). Activated sludge model (ASM) based modelling of membrane bioreactor (MBR) processes: A critical review with special regard to MBR specificities. *Water Research*, 44 (15), 4272-4294, IF 13,400, <https://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2010.06.007>, <https://hal.inrae.fr/hal-02661330>

[JJ31] **Julie Jimenez**, Patricia Grelier, Jens Meinhold, Annie Tazi-Pain (2010). Biological modelling of MBR and impact of primary sedimentation. *Desalination*, 250 (2), 562-567, IF 11,211, <https://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.024>, <https://hal.inrae.fr/hal-02660708>

Publications en cours de soumission

[JJ32] **Julie Jimenez**, Dominique Patureau, Françoise Watteau, Thierry Morvan (en cours de soumission). Deciphering the organic matter mineralisation kinetics of cattle farmyard manure thanks to organic matter fractionation and litterbags soil assay. *Biol. Fertil. Soils*.

[JJ33] **Julie Jimenez**, Virginie Rossard, Romain Girault, Anne Wallrich, Florian Christ, Denis Ollivier, Dominique Patureau, Eric Latrille, Sabine Houot (en cours de soumission). Concept-Dig: design support tool for the agronomic valorization of digestates from agriculture residues. *Waste Management*.

[JJ34] **Julie Jimenez**, Quentin Aemig, Jean-Philippe Steyer, Dominique Patureau (en cours de soumission). Modelling anaerobic digestion and composting of organic residus: towards organic matter fate prediction in soils. *Bioresource Technology*.

[JJ35] Margaud Pereme, Antoine Haddon, Jean-Philippe Steyer, **Julie Jimenez** (soumis). SoilFrac: A mechanistic model accounting for the fate of exogenous organic matter in soil carbon and nitrogen cycles. *Waste Management*.

[JJ36] David Fernández-Domínguez, Dominique Patureau, **Julie Jimenez** (soumis). Impact of substrate biodegradability on the identification of endogenous compounds during anaerobic digestion. *Biomass and Bioenergy*.

Chapitres d'Ouvrages

[CO01] Julie Jimenez (2022). *Anaerobic digestate as fertilizer for land application* in: *Anaerobic Digestate Management*. IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789062755_0025

[CO02] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, Florian Monlau, Céline Vaneekhaute (2022). *Valorisation of Anaerobic Digestate: Towards Value-Added Products*. In: *Renewable Energy Technologies for Energy Efficient Sustainable Development*. Springer International Publishing, https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-87633-3_9, <https://hal.inrae.fr/hal-03546575>

[CO03] Hélène Carrère, Georgia Antonopoulou, Céline Druilhe, Eric Latrille, Gérasimos Lyberatos, **Julie Jimenez**, Ioanna Ntaikou, Konstantina Papadopoulou, Eric Trably, Anne Trémier (2020). *Methods to*

Assess Biological Transformation of Biomass. In: Handbook on Characterization of Biomass, Biowaste and Related By-products. Springer International Publishing, 641-730, https://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-35020-8_5, <https://hal.inrae.fr/hal-02918268>

Communications à des congrès et colloques : conférence invitée

[PO1] **Julie Jimenez**, Pascal Peu (2018). *Etat des lieux des connaissances sur les facteurs de contrôle du potentiel méthanogène d'un substrat et de la composition de son biogaz*, Presented at : Journées Recherche Innovation Biogaz Méthanisation - JRI 2018, fr, (2018-10-02), <https://hal.inrae.fr/hal-02940648>

[PO2] Mathieu Sperandio, **Julie Jimenez**, Diana Garcia-Bernet (2016). *Programmes de recherche sur la valorisation des nutriments*. np, Presented at : Journées Techniques Eau et Déchets JTED 2016, fr, (2016-11-16), <https://hal.inrae.fr/hal-01608024>

[PO3] Jean-Philippe Steyer, **Julie Jimenez**, Eric Latrille, Jérôme Harmand, Angel Robles Martinez (2015) Keynote: *Instrumentation and control of anaerobic digestion processes: A review and some research challenges*. 14. World Congress on Anaerobic Digestion (AD14), International Water Association (IWA). INT., (2015-11-17), Viña del Mar, Chile, <https://hal.inrae.fr/hal-02742240>

Communication à des congrès et colloques : abstract et full paper

[PO4] Margaud Pérémé, Antoine Haddon, Jean-Philippe Steyer, **Julie Jimenez** (2022). *Anaerobic Digestion Modelling: From Energetic Value Of Wastes To Agronomic Fate Of Digestates*. Presented at: WasteEng22 Copenhagen, Denmark (2022-06- 27 – 2022-06-29).

[PO5] David Fernández-Domínguez, Dominique Patureau, **Julie Jimenez** (2022). *Insights into the organic matter quality during anaerobic digestion by coupling biochemical fractionation with 3D fluorescence and FTIR-PAS*. Presented at: WasteEng22 Copenhagen, Denmark (2022-06- 27 – 2022-06-29).

[PO6] David Fernández-Domínguez, Dominique Patureau, Sepher Shakeri Yekta, **Julie Jimenez** (2022). *Deciphering the organic matter stabilization during anaerobic digestion according to substrate type*. Presented at: 17th World Congress on Anaerobic Digestion – AD17 2022, Michigan, USA (2022-06-19-2022-06-21)

[PO7] **Julie Jimenez**, Virginie Rossard, Romain Girault, Anne Wallrich, Florian Christ, Denis Ollivier, Dominique Patureau, Eric Latrille, Sabine Houot (2022). *Concept-Dig: design support tool for the agronomic valorization of digestates from agriculture residues*. Presented at : 17th World Congress on Anaerobic Digestion – AD17 2022, Michigan, USA (2022-06-19- 2022-06-21)

[PO8] David Fernández-Domínguez, Dominique Patureau, Sabine Houot, Nicolas Sertillanges, Bastien Zennaro, **Julie Jimenez** (2022). *Prédire l'accessibilité et la complexité de la matière organique des digestats pour l'évaluation de leur stabilité en carbone organique au sol*. Presented at: Journées Recherche Innovation Biogaz Méthanisation - JRI 2022, Lyon, France (2022-03-14-2022-03-16).

[PO9] Margaud Pérémé, Antoine Haddon, Jean-Philippe Steyer, **Julie Jimenez** (2022). *Modélisation de la filière de méthanisation : de la valorisation énergétique à la valorisation agronomique des résidus organiques*. Journées Recherche Innovation Biogaz et méthanisation (JRI2022). Presented at : Journées Recherche Innovation Biogaz Méthanisation - JRI 2022, Lyon, France (2022-03-14-2022-03-16).

[PO10] **Julie Jimenez**, Romain Girault, Anne Tremier, Anne Wallrich, Claire Calmette, Florian Christ, Denis Ollivier, Dominique Patureau, Eric Latrille, Jean-Michel Commandre, Sabine Houot (2020). *Concept-Dig, outil d'aide à la conception de filière pour la valorisation agronomique des digestats*. Presented at : Journées Recherche Innovation Biogaz Méthanisation - JRI 2020, Toulouse, France (2020-09-08 - 2020-09-10), <https://hal.inrae.fr/hal-02940672>

[PO11] **Julie Jimenez**, Dominique Patureau, Marco Grigatti, Nicolas Bernet (2019). *Impact de la typologie des digestats sur les nutriments disponibles pour la plante : utilisation d'indicateurs de caractérisation pour prédire la fertilisation minérale*. Presented at : 14èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, Dijon, France (2019-11-20 - 2019-11-21), <https://hal.inrae.fr/hal-03749961>

[PO12] Felipe Guilayn, Dominique Patureau, **Julie Jimenez**, Maxime Rouez (2019). *Substances humiques à partir de digestats : biostimulation racinaire et croissance de production légumière en culture hydroponique*. Presented at : Les Intrants durables au service des sols agricoles urbains et périurbains, Romainville, France (2019-05-14 - 2019-05-16), <https://dx.doi.org/10.15454/244e-f426>, <https://hal.inrae.fr/hal-03359974>

[PO13] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, Dominique Patureau, Maxime Rouez, Marion Crest (2019). *Les digestats : un produit au regard de la nouvelle réglementation européenne sur les fertilisants ?* Presented at : Les Intrants durables au service des sols agricoles urbains et périurbains, Romainville, France (2019-05-14 - 2019-05-16), <https://dx.doi.org/10.15454/bwwn-da81>, <https://hal.inrae.fr/hal-03359753>

[PO14] **Julie Jimenez**, Dominique Patureau (2019). *Digestats de méthanisation ou comment la variabilité des sous-produits de la valorisation énergétique des résidus organiques peut combler les divers besoins des agrosystèmes*. Presented at : Les Intrants durables au service des sols agricoles urbains et périurbains, Romainville, France (2019-05-14 - 2019-05-16)

[PO15] Felipe Guilayn, Mohammed Benbrahim, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau, **Julie Jimenez** (2019-06-23). *Digestate soluble organic matter extracts versus commercial humic substances for biostimulation of hydroponic systems*. Presented at : 16th IWA World Conference on Anaerobic Digestion, Delft, Pays-Bas (2019-06-23 - 2019-06-27), <https://dx.doi.org/10.15454/3n40-0g03>, <https://hal.inrae.fr/hal-03360094>

[PO16] Bastien Zennaro, **Julie Jimenez**, Jean-Philippe Steyer, Sabine Houot, Cyril Girardin, Paul Marchand, Jeanne-Chantal Thoisy-Dur, Henry Fisgativa, Fabrice Béline, Jeremy Miroux, Cyrille Carnier, Julien Budin, Charlotte Richard, Elodie Le Cadre Loret, Geoffrey Karakachian, Julien Werly, Fabien Rupin, Frédéric Falot, Guillaume Accarion, Emmanuelle Baudu, Eric Latrille (2019). *Caractérisation rapide des digestats de méthanisation par proche infrarouge pour une meilleure valorisation*. Presented at : Colloque APIVALE 2019, Produits Résiduaires Organiques : Ingrédients Clés de la Bioéconomie circulaire, (2019 - 2019), <https://hal.inrae.fr/hal-02791340>

[PO17] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau (2018). *Séparation de phases et digestats : profils d'efficacité basés sur les intrants de digestion anaérobie et le choix du séparateur*. Presented at : Journées Recherche Innovation Biogaz Méthanisation - JRI 2018, Rennes, France (2018-10-02 - 2018-10-04), <https://dx.doi.org/10.15454/0egj-ss72>, <https://hal.inrae.fr/hal-01976248>

[PO18] **Julie Jimenez**, Nicolas Sertillanges, Sabine Houot, Dominique Patureau (2018). *Caractérisation de la matière organique : outil d'aide à la compréhension des mécanismes de la digestion anaérobie et*

de la qualité du digestat. Presented at : Journées Recherche Innovation Biogaz Méthanisation - JRI 2018, Rennes, France (2018-10-02 - 2018-10-04), <https://hal.inrae.fr/hal-02940648>

[PO19] Anne Wallrich, Denis Ollivier, **Julie Jimenez**, Sabine Houot (2018). *Définition de classes de digestats agricoles en vue de la préconisation de leur insertion dans les pratiques de fertilisation*. Presented at : JRI biogaz méthanisation 2018, Rennes, France (2018-10-02 - 2018-10-04), <https://hal.inrae.fr/hal-02737352>

[PO20] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau (2018). *Mass balance and performance of common digestate mechanical separation equipment and fertilizing-value typology of liquid and solid fractions*. Presented at : 7. International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation (WasteEng2018), Prague, Tchéquie (2018-07-02 - 2018-07-05), <https://dx.doi.org/10.15454/ha2n-1v41>, <https://hal.inrae.fr/hal-02734540>

[PO21] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau (2017). *Digestate typology from common fertilizing-value parameters: feedstock influence and recovery potentials*. Presented at : 15. IWA World Conference on Anaerobic Digestion (AD-15), Beijing, Chine (2017-10-17 - 2017-10-20), <https://dx.doi.org/10.15454/sd7q-3e22>, <https://hal.inrae.fr/hal-02737702>

[PO22] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, M. Rouez, Dominique Patureau (2017). *Typologie des digestats de méthanisation à partir de paramètres usuels de valeur amendement/fertilisante*. Presented at : Journées Recherche et Industrie biogaz méthanisation - JRI 2017, Beauvais, France (2017-04-11 - 2017-04-13), <https://dx.doi.org/10.15454/s0dn-wk41>, <https://hal.inrae.fr/hal-01605862>

[PO23] Felipe Guilayn, **Julie Jimenez**, M. Rouez, Dominique Patureau (2017). *Typologie des digestats de méthanisation à partir de paramètres usuels de valeur amendement/fertilisante*. Presented at : Journées Recherche et Industrie biogaz méthanisation - JRI 2017, Beauvais, France (2017-04-11 - 2017-04-13), <https://dx.doi.org/10.15454/s0dn-wk41>, <https://hal.inrae.fr/hal-01605862>

[PO24] Sabine Houot, **Julie Jimenez**, Dominique Patureau (2016). *Quelle place pour la méthanisation dans la gestion de la matière organique à l'échelle de l'agrosystème ?* Presented at : Journées Recherche et Industrie Biogaz méthanisation, Limoges, France (2016-02-10 - 2016-02-12), <https://hal.inrae.fr/hal-01594815>

[PO25] **Julie Jimenez**, Quentin Aemig, Jean-Philippe Steyer, Sabine Houot, Dominique Patureau (2016). *Modelling anaerobic digestion and compost of organic residues: towards organic matter fate prediction in soils during land spreading*. Presented at: WasteEng2016. 6. International Conference on Engineering for Waste and Biomass Valorisation, Albi, France (2016-05-23 - 2016-05-26), <https://hal.inrae.fr/hal-02744020>

[PO26] **Julie Jimenez**, Quentin Aemig, Jean-Philippe Steyer, Dominique Patureau, Sabine Houot (2016). *Modelling anaerobic digestion and compost of organic residues: towards organic matter fate prediction in soils*. Presented at: ORBIT 2016 Organic Resources and Biological Treatment - 10. International Conference on Circular Economy and Organic Waste, Heraklion, Grèce (2016-05-25 - 2016-05-28), <https://hal.inrae.fr/hal-02739210>

[PO27] Cyrille Charnier, Eric Latrille, **Julie Jimenez**, Michel Torrijos, Margaux Lemoine, Jérémie Miroux, Jean-Philippe Steyer (2016). *Analyse rapide des substrats pour la planification des recettes de mélanges*. Presented at : Journées Recherche et Industrie Biogaz méthanisation, Limoges, France (2016-02-10 - 2016-02-12), <https://hal.inrae.fr/hal-01595183>

[PO28] **Julie Jimenez**, Cyrille Charnier, Eric Latrille, Michel Torrijos, Jérôme Harmand, Dominique Patureau, Mathieu Sperandio, Eberhard Morgenroth, Fabrice Béline, George Ekama, Peter Vanrolleghem, Angel Robles Martinez, Aurora Seco, Damien J. Batstone, Jean-Philippe Steyer (2016). *Modelling hydrolysis: simultaneous versus sequential biodegradation of the hydrolysable fractions*. Presented at: 5. Wastewater Treatment Modelling Seminar. WWTmod2016, Annecy, France (2016-04-02 - 2016-04-06), <https://hal.inrae.fr/hal-01886388>

[PO29] Anne-Marie Pourcher, Christine Ziebal, Géraldine Maynaud, Celine Druilhe, Eric Latrille, Dominique Patureau, **Julie Jimenez**, Nathalie Wéry (2015). *Persistence of Salmonella Derby and Listeria monocytogenes in digestates derived from pig and dairy farms*. Presented at : XVII International Congress on Animal Hygiene 2015, ISAH 2015, Košice, Slovaquie (2015-06-07 - 2015-06-11), <https://hal.inrae.fr/hal-02739657>

[PO30] Quentin Aemig, **Julie Jimenez**, Dominique Patureau, Julien Michel, Pauline Molina, Marjolaine Marjolaine Deschamps, Sabrina Ferhi, Sabine Houot (2015). *Evaluation et réduction des risques de contamination par des polluants organiques dans le contexte de l'usage de produits résiduels organiques sur sols agricoles*. Presented at : Assemblée Générale du SOERE PRO, Colmar, France (2015-11-24 - 2015-11-24), <https://hal.inrae.fr/hal-02797417>

[PO31] **Julie Jimenez**, Camila Espinoza Cavajal, Quentin Aemig, Sabine Houot, Jean-Philippe Steyer, Fabien Vedrenne, Dominique Patureau (2015). *Organic matter characterization: towards a unified methodology for biological treatments modelling*. Presented at : 14. World Congress on Anaerobic Digestion (AD14), Viña del Mar, Chili (2015-11-15 - 2015-11-18), <https://hal.inrae.fr/hal-02743262>

[PO32] **Julie Jimenez**, Han Lei, Jean-Philippe Steyer, Sabine Houot, Dominique Patureau (2015). *Organic matter stability and accessibility characterization - Towards a tool for organic residue diagnostic before land spreading*. Presented at : RAMIRAN 2015 16. International Conference Rural-Urban Symbiosis, Hambourg, Allemagne (2015-09-08 - 2015-09-10), <https://hal.inrae.fr/hal-02740786>

[PO33] **Julie Jimenez**, Quentin Aemig, Jean-Philippe Steyer, Dominique Patureau (2014). *Anaerobic digestion modelling: innovative characterization tool and extension to micropollutant fate*. Presented at: 2. IWA Specialized International Conference. EcoSTP2014, EcoTechnologies for Wastewater Treatment. Technical, Environmental & Economic Challenges, Verona, Italie (2014-06-23 - 2014-06-27), <https://hal.inrae.fr/hal-02739270>

[PO34] **Julie Jimenez**, Estelle Gonidec, Jean-Philippe Steyer, Eric E. Latrille, Fabien Vedrenne, Jesús Andrés Cacho Rivero (2013-06-25). *Prediction of anaerobic biodegradability and bioaccessibility of municipal sludge by coupling sequential extractions with fluorescence spectroscopy: towards ADM1 implementation*. Presented at: 13. World Congress on Anaerobic Digestion: Recovering (bio) Resources for the World. AD13, Santiago de Compostela, Espagne (2013-06-25 - 2013-06-28), <https://hal.inrae.fr/hal-02745513>

[PO35] Alexis Mottet, Iván Ramírez, Hélène Carrère, **Julie Jimenez**, Stephano Délérís, Fabien Vedrenne, Jean-Philippe Steyer (2010). *New particulate organic matter mapping in ADM1 for sludge digestion*. Presented at : 12th World Congress on anaerobic digestion, Guadalajara, Mexique (2010-10-31 - 2010-11-04), <https://hal.inrae.fr/hal-02753303>

Communication à des congrès et colloques : poster

[Poster_1] Felipe Guilayn, Mohammed Benbrahim, **Julie Jimenez**, Maxime Rouez, Dominique Patureau, Marion Crest (2019). *Extraits de matière organique soluble de digestats de méthanisation pour la biostimulation de la croissance de plantes cultivées en système hydroponique*. Presented at :

14èmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse, Dijon, France (2019-11-20 - 2019-11-21), <https://dx.doi.org/10.15454/mamn-6923>, <https://hal.inrae.fr/hal-03360110>

[Poster_2] **Julie Jimenez**, Marco Grigatti, Dominique Patureau, Nicolas Bernet (2018). *Nutrients accessibility analysis of organic residues from wastes: fertilizing indicators?* Presented at : 5. AgreenSkills Annual Meeting, Édimbourg, Royaume-Uni (2018-06-11 - 2018-06-14), <https://hal.inrae.fr/hal-02790493>

[Poster_3] Sabine Houot, **Julie Jimenez** (2017). *Qualité agronomique des produits résiduaux PRO : comment l'évaluer et comment l'inclure dans les outils de gestion de la fertilisation ?* Presented at : Rencontre Recyclage des produits résiduaux organiques en agriculture, INRA Transfert Environnement, Institut Carnot 3BCAR, Paris, France (2017-12-01 - 2017-12-01), <https://hal.inrae.fr/hal-01708611>

[Poster_4] **Julie Jimenez**, Dominique Patureau, Thierry Morvan (2017). *Deciphering the organic matter kinetics of fresh and dried cattle farmyard manure thanks to organic matter fractionation and litter bags soil incubation assay.* Presented at : 17. International Ramiran Conference, Wexford, Irlande (2017-09-04 - 2017-09-06), <https://hal.inrae.fr/hal-02790182>

[Poster_5] **Julie Jimenez**, Quentin Aemig, Jean-Philippe Steyer, Dominique Patureau (2014). *ADM1 implementation with an innovative organic matter characterization methodology based on chemical sequential extractions and 3D fluorescence spectroscopy: extension to organic micropollutants fate.* Presented at: 4. IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar. WWTmod2014, Spa, Belgique (2014-03-30 - 2014-04-02), <https://hal.inrae.fr/hal-02793861>

[Poster_6] **Julie Jimenez** (2015). *Caractérisation de la matière organique des produits résiduaux organiques : outil d'optimisation des filières de traitements jusqu'à leur devenir au sol.* Presented at : Journées Recherche Industrie Biogaz-Méthanisation (JRI2015), Rennes, France (2015-02-03 - 2015-02-06), conférence invitée. <https://hal.inrae.fr/hal-01163011>

[Poster_7] **Julie Jimenez**, Quentin Aemig, Jean-Philippe Steyer, Dominique Patureau (2014). *ADM1 implementation with an innovative organic matter characterization methodology based on chemical sequential extractions and 3D fluorescence spectroscopy: extension to organic micropollutants fate.* Presented at: 4. IWA/WEF Wastewater Treatment Modelling Seminar. WWTmod2014, Belgium (2014-03-30 -), <https://hal.inrae.fr/hal-02793861>

Thèse pour l'obtention du grade de docteur

[Thèse_JJ] Julie Jimenez (2012). *Organic matter characterization with 3D fluorescence spectroscopy for anaerobic digestion modeling of wastewater treatment sludge.* (Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques). 267 p., <https://hal.inrae.fr/tel-02810690>

Déclarations d'inventions (brevets, logiciels, marques)

[Brevet_1] Cyrille Charnier, Eric Latrille, Julie Jimenez, Jérémie Miroux, Jean-Philippe Steyer, Michel Torrijos, Philippe Sousbie, Margaux Lemoine (2016). *Procédé de configuration d'un modèle de prédiction des caractéristiques d'un substrat de méthaniseur et utilisation de modèles pour l'estimation de la biodégradation d'un substrat.* FR3047562A1, 52 p., <https://hal.inrae.fr/hal-02786650>

Déclarations d'invention et de résultats valorisables :

[DIRV_1] Julie Jimenez, Dominique Patureau, Quentin Aemig, Jean-Philippe Steyer, Mathieu Muller (2019). **Indice de Stabilité et de Bio-accessibilité de la Matière Organique (ISBaMO).** Marque ISBaMO déposée (20/05/21), N°018474884

Chapitre 1. Curriculum Vitae détaillé

[DIRV_2] Julie Jimenez, Virginie Rossard, Eric Latrille, Florian Christ, Romain Girault, Jean-Michel Commandre, Sabine Houot (2019). **Outil d'aide à la conception de filière pour la valorisation agronomique des digestats : Concept-Dig.** *Marque CONCEPT DIG déposée (23/11/21), N°214819581*

[DIRV_3] Miniaturisation du procédé de compostage (en cours)

Dépôt Agence pour la Protection des Programmes : CONCEPT DIG, N°IDDN.FR.001.280008.000.S.P.2022.000.10000 (11/07/2022)

Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche

1. Contexte

1.1. Changements globaux et agroécologie

Pour faire face aux changements globaux, changement climatique, croissance démographique mondiale, sécurité alimentaire, préservation des ressources, de nouveaux enjeux de recherche sont apparus. Dans le domaine de l'agriculture, la spécialisation et l'intensification (via l'utilisation excessive d'intrants chimiques) ont généré des impacts environnementaux majeurs (sols, eaux, climat, biodiversité). Ainsi, un des enjeux majeurs est de concilier une production agricole suffisante (en quantité et en qualité) pour satisfaire à la fois une demande mondiale en croissance, permettre le développement économique et social, et assurer la préservation de l'environnement et la limitation des risques pour la santé humaine et les écosystèmes. Une des solutions repose sur un changement de paradigme afin de s'orienter vers l'**Agroécologie** (Altieri, 2002).

D'après (Malézieux and Lafontaine, 2013), l'hypothèse principale sur laquelle repose l'agroécologie est qu'il est possible d'augmenter les productions agricoles en quantité et en qualité, d'assurer une meilleure maîtrise des populations de ravageurs et de diminuer la dépendance vis-à-vis des intrants, en accroissant la diversité biologique dans les agroécosystèmes et en optimisant les interactions biologiques au sein de ces derniers. Les systèmes agroécologiques peuvent notamment participer à une gestion plus durable du cycle de l'eau et des cycles biogéochimiques de l'azote, du phosphore et du carbone. De plus, lors de la COP 21 (2015), et sur la base d'une étude menée par INRAE via une modélisation long terme, le cap de 4 ‰ a été fixé pour neutraliser l'augmentation annuelle du carbone atmosphérique et compléter l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Minasny et al., 2017). En effet, l'initiative « 4 ‰ » consiste à promouvoir le stockage du Carbone, à hauteur de 4 ‰ /an, sous forme de matière organique (MO) dans le sol (via l'apport en intrants organiques, la couverture des sols, la production de légumineuses, l'agroforesterie augmentant la photosynthèse) et ainsi compenser l'augmentation des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. D'après cette initiative, en augmentant la teneur en MO dans les sols, leurs fertilités augmentent et la préservation de la sécurité alimentaire et du climat est supportée. En France, d'après INRAE (Pellerin et al., 2019), 41% des émissions de carbone agricole pourrait être compensés avec un stockage additionnel de 1,9‰ sur l'ensemble des surfaces agricoles et forestières (3,3 ‰ pour les seules surfaces agricoles et 5,2 ‰ pour les grandes cultures). Les pratiques conseillées sont la mise en place de couverts intercalaires et intermédiaires, l'introduction et allongement des prairies temporaires dans les rotations culturales, le développement de l'agroforesterie, l'apport de composts ou produits résiduels organiques issus de la valorisation de résidus organiques.

La transition agroécologique nécessite donc des pratiques de production agricole qui préservent mieux l'environnement et des alternatives aux intrants chimiques, par exemple grâce à un recyclage accru des déchets pour une gestion plus durable de la nutrition des plantes et de la qualité des sols.

1.2. Déchets organiques et Bioraffinerie Environnementale : vers un changement de paradigme

L'utilisation de matières organiques dans l'agriculture en tant que fertilisants était pratiquée au XIXe siècle et auparavant. Au XXe siècle, les produits résiduels organiques urbains ont été considérés comme « déchets » et ont été écartés de leur utilisation agronomique au profit d'engrais chimiques (Barles, 2005). Dans les années 1980, les pratiques de réutilisation agricole des résidus urbains sont à nouveau à l'ordre du jour. Par ailleurs, sous l'effet de l'urbanisation rapide et de la croissance démographique, il est prévu que la production mondiale de déchets augmente de 70 % d'ici 2050, soit une moyenne de plus de 2 milliards de tonnes de déchets par an, selon un rapport de la Banque mondiale (Kaza et al., 2018).

En France, l'équivalent de 343 millions de tonnes de déchets sont produits chaque année (Bilan 2018 de la production de déchets en France, Ministère de la transition écologique). Il existe trois catégories de déchets : déchets dangereux (3% du tonnage en France, 2018), déchets non dangereux (28% du tonnage en France, 2018) et déchets non dangereux inertes (69% du tonnage en France, 2018). Ces derniers sont essentiellement issus des activités du bâtiment. Le gisement intéressant ici est celui contenu dans les déchets non dangereux et plus particulièrement les déchets organiques. Ces derniers peuvent provenir d'activités urbaines et agricoles ou assimilées générant une variabilité de ressources potentielles significative. Tout au long de ce mémoire, ces déchets qui seront appelés par la suite **résidus organiques** peuvent être classés en trois grandes catégories : les résidus urbains, agricoles et ceux issus des activités industrielles (agro-industries). Parmi les déchets urbains, on retrouve la fraction fermentescible des ordures ménagères (FFOM), les résidus provenant de l'assainissement (boues de station d'épuration STEP) et les biodéchets (déchets verts, déchets alimentaires provenant des restaurants ou cantines, déchets alimentaires triés à la source, déchets alimentaires des grandes et moyennes surfaces). Parmi les déchets agricoles, on peut citer les déjections animales produites par les installations d'élevage (fumiers, lisiers) ou encore les résidus de récolte et enfin les résidus issus des activités industrielles notamment d'industries agro-alimentaires.

Une gestion durable de ces déchets est gouvernée par deux enjeux majeurs : la limitation de leurs productions et leur valorisation et réutilisation. En effet, les déchets organiques provenant des diverses sources citées précédemment sont riches en MO et nutriments et valorisables à différents niveaux selon leur qualité. Certains résidus organiques ont des potentiels énergétiques non négligeables (tel qu'un potentiel de production de méthane via la méthanisation par exemple), d'autres ont des potentiels agronomiques évidents (qualité de MO en adéquation avec les besoins des sols en termes d'amendements et/ou sources de nutriments NPKS en adéquation avec les besoins en fertilisation chimique des plantes). Certains résidus possèdent également des molécules d'intérêt (précurseurs de bioplastiques, substances humiques, molécules organiques réutilisables en industrie chimique, etc...) extractibles via des procédés dédiés. Ainsi, ces résidus organiques, bien qu'à limiter et diminuer, constituent aussi une opportunité pour répondre aux services rendus à la fois agronomiques, énergétiques, chimiques. En les recyclant et les valorisant au maximum, les enjeux environnementaux et climatiques associés pourraient être atténués dans une logique de **bioéconomie circulaire**.

Classiquement, les deux grandes voies principales de valorisation des déchets organiques non dangereux sont le compostage et la valorisation énergétique via la méthanisation (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires and Ministère de la Transition Energétique, 2021). Longtemps utilisée, la mise en décharge dans des centres de stockage est désormais réservée aux déchets dit « ultimes », à savoir pour lesquels aucune autre valorisation n'est possible. La loi de transition énergétique pour la croissance verte a notamment fixé un objectif de réduction de l'élimination par stockage de moitié en 2025 avec une étape intermédiaire de -30 % en 2020, par rapport aux quantités admises en décharge en 2010.

Le compostage consiste en une biodégradation en deux temps, en présence d'oxygène, dans des conditions opératoires données (ratio C/N, taux d'humidité, tassement), de la MO afin d'à la fois hygiéniser (via une réaction exothermique réalisée par des bactéries dans un premier temps) puis stabiliser la matière (i.e. humifier la matière via l'action de plusieurs micro-organismes dont les bactéries, les champignons et actinomycètes) avec un objectif de retour au sol. Ce retour au sol doit présenter les garanties nécessaires en termes d'innocuité sanitaire et de qualité agronomique. Les normes NF U 44-095 sur les composts de boues et NF U 44-051 sur les amendements organiques, ont

été rendues d'application obligatoire et fixent des critères à respecter pour ces composts afin d'encadrer l'innocuité et l'efficacité de ces derniers en agriculture.

La méthanisation ou digestion anaérobie consiste en une succession de réactions biologiques de la MO en l'absence d'oxygène réalisées par des bactéries et Archae afin de produire un mélange gazeux composé en majorité de méthane et de gaz carbonique, de transformer la MO initiale en un produit humide, partiellement stabilisé, appelé le digestat. En plus de la production de biogaz qui fait l'objet d'une valorisation énergétique intéressante, le digestat, qui est un déchet aux caractéristiques fertilisantes, peut être épandu sur les sols agricoles quand il respecte la réglementation du code rural. Sa valorisation agronomique est possible de différentes manières : après une phase de maturation par compostage, ou directement par son épandage sur les sols agricoles, s'il respecte le cahier des charges CDIGAgri (Journal Officiel de la République Française, 2020) concernant les digestats d'origine agricole, dans le cadre d'un plan d'épandage, ou bien encore s'il est homologué pour devenir un produit commercialisable. Ce procédé connaît un fort essor depuis 2013 et le lancement du Plan Energie Méthanisation Autonomie Azote (EMAA) adopté par le gouvernement visant la mise en place d'installations de méthanisation à la ferme, les autres types de méthanisation étant également encouragés et faisant l'objet de subventions de la part de l'ADEME. De plus, le tarif intéressant de rachat de l'électricité produite par co-génération combinée à l'augmentation des sites de méthanisations favorisant l'injection de gaz directement dans le réseau de gaz naturel font de ce procédé un atout économique non négligeable. **Au 1er janvier 2022, on dénombrait en France 1 308 unités de méthanisation dont 371 en injection et 759 en cogénération.** En 2022, 71 nouveaux sites d'injection de biométhane ont été mis en service et 3,1 TWh de biométhane ont été injectés depuis le début de l'année (GRDF, 2022). A la fin juin 2022, **442 sites ont été** raccordés à tout réseau gazier dont **376 sites** raccordés au réseau GRDF. Cela représente une production de près de **7,6 TWh/an**, soit l'équivalent de la consommation annuelle de plus de 1 900 000 logements neufs (GRDF, 2022).

La valorisation de ce gisement de résidus organiques en énergie et/ou en engrais organique est un enjeu majeur dans le recyclage des produits résiduels pour boucler les cycles géochimiques (C, N, P, K et S) et préserver l'environnement via une bioéconomie circulaire. Pour réussir cette transition agroécologique, le développement de procédés permettant à la fois la production d'énergies renouvelables et de fertilisants organiques comme la méthanisation est un des leviers d'action. A titre d'exemple, plus de 200 unités de méthanisation implantées dans les exploitations agricoles françaises et raccordées au réseau de gaz ont permis d'économiser 450 000 tonnes d'équivalent CO₂ en 2020 (données GRDF, 2021). Un exemple de bioéconomie circulaire réussie dans un territoire à forte empreinte animale est représenté par la Figure 2. Cet exemple associe des activités de production de chaleur, de biogaz, d'abattage d'animaux, de traitement et recyclage de l'eau, de traitements d'effluents et de production d'engrais organiques via notamment l'utilisation de la méthanisation.

La gestion des déchets organiques longtemps considérée plutôt comme un traitement de ces derniers est devenue maintenant une véritable valorisation où les résidus organiques sont devenus des ressources à exploiter. D'après l'ADEME, « la valorisation des déchets organiques doit passer par une logique de déchet à une logique de produit. Pour pouvoir être recyclés ou valorisés, les « déchets » organiques ne doivent plus être considérés comme des résidus dont il faut se débarrasser mais comme des matières premières qui peuvent présenter un intérêt soit agronomique (fertilisation, apport de MO...), soit matière (alimentaire ou industriel), soit énergétique» (Chauvin, 2004).

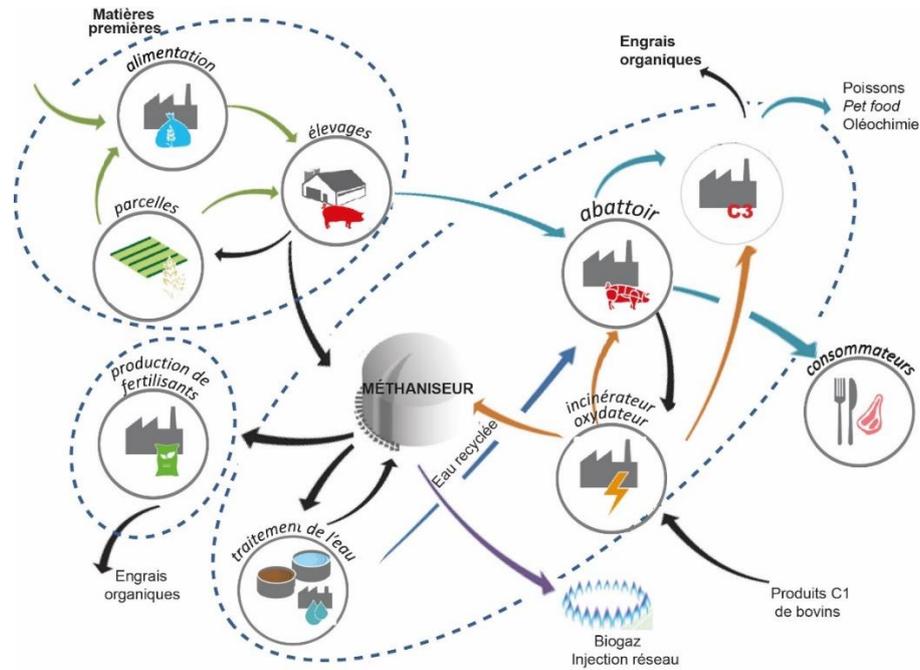


Figure 2 : Exemple de bioéconomie circulaire dans un territoire à forte empreinte animale (Dourmad et al., 2019)

C'est dans ce contexte de changement de paradigme qu'un concept innovant est apparu : la **Bioraffinerie Environnementale** (Garcia-Bernet and Daboussi, 2016). **Les bioraffineries ont pour vocation de transformer l'ensemble des fractions constitutives d'une ressource organique dans l'optique d'une valorisation complète et dans un contexte de bioéconomie circulaire.** Cet ensemble peut combiner plusieurs outils tels que des extractions de molécules à haute valeur ajoutée, la production de bio-carburant, d'énergie, de biomatériaux, de fertilisants organiques, etc... Chaque coproduit devient alors une « matière première » à part entière à valoriser. L'optimisation de cette valorisation repose néanmoins sur la connaissance des résidus organiques afin de cibler des services rendus pertinents, l'utilisation et/ou la création d'un panel de procédés ciblant les dits-services rendus et la mise en place d'une filière de traitement respectueuse de l'environnement (minimisation des impacts environnementaux, innocuité, ...). Tout autant de connaissances à apporter que de questions de recherche associées sous le couvert de la recherche du compromis.

1.3. Problématiques de recherche : INRAE et LBE

La transition agroécologique est devenue une des orientations scientifiques majeures au sein de **INRAE**. En effet, INRAE étudie les conditions d'une transition de l'agriculture vers des **systèmes multi-performants, bas carbone et bas intrants**, en mobilisant les principes de l'agroécologie, notamment via les enjeux scientifiques portés par le département AgroEcoSystem. En parallèle, INRAE se positionne comme un acteur de la **bioéconomie circulaire** en proposant quatre questions de recherche portées par le département Transform : « Comment produire et mobiliser plus de biomasse sous contrainte climatique tout en préservant écosystèmes et ressources ? Comment optimiser la transformation des biomasses dans toute leur diversité ? Comment assurer le recyclage des matériaux afin de boucler les cycles biologiques du carbone, de l'azote et du phosphore ? Comment anticiper, organiser et gérer les flux, les échanges et les marchés dans un contexte d'incertitude ? »

Au carrefour de ces départements et de leurs enjeux se situent les recherches menées par l'unité **LBE** (Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement) de Narbonne, à l'origine du concept de **Bioraffinerie Environnementale (Figure 3)**, valorisant un large panel de résidus organiques en divers services rendus (bioénergies, biomolécules, amendement et fertilisant organique) tout en minimisant

leur impact environnemental et sanitaire, avec un focus sur les procédés biologiques classiques (fermentation, méthanisation, compostage) et innovants (bioélectrochimie, culture de microalgues).

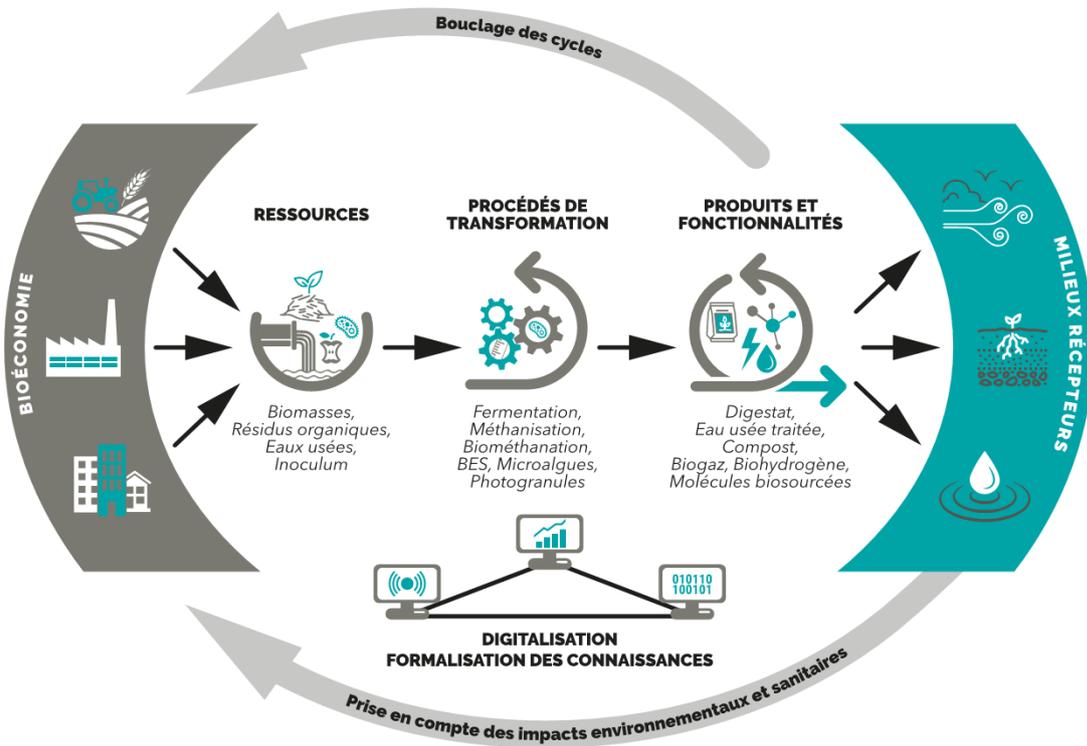


Figure 3 : Schéma de la Bioraffinerie Environnementale, thématique centrale au sein des recherches du LBE

1.4. Stratégie de recherche

Ainsi, une gestion durable des déchets organiques permettrait de répondre aux besoins de la transition agroécologique via la production de fertilisants organiques nécessaires à la substitution d'engrais minéraux et participant au bouclage des cycles géochimiques (CNPKS) et notamment au stockage de C dans les sols. Le schéma de la Figure 4 présente cette adéquation, comprenant d'une part les enjeux majeurs de la gestion durable des déchets organiques et d'autre part ceux de la transition agroécologique et leurs moyens associés.

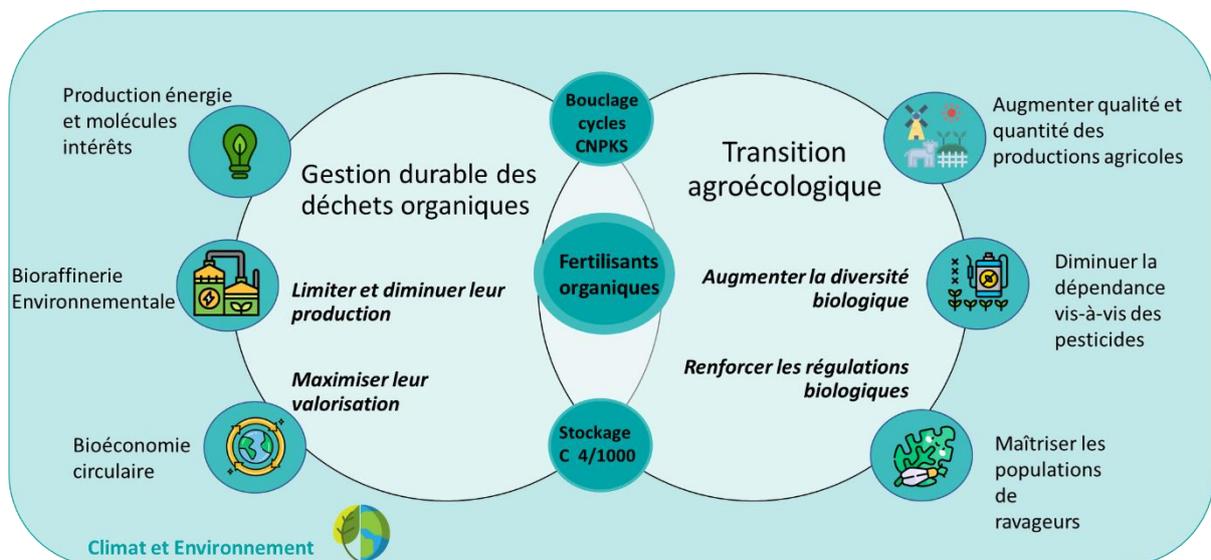


Figure 4 : Schématisation de l'adéquation entre Gestion durable des déchets organiques et la Transition Agroécologique (Source : schéma personnel)

C'est dans ce contexte que j'ai été recrutée au LBE en tant que chargée de recherche sur la thématique "Adaptation et intégration des procédés biologiques de traitement des résidus organiques pour une gestion durable des agroécosystèmes".

Le concept de **Bioraffinerie Environnementale** repose sur l'idée d'utiliser et de combiner la meilleure configuration de procédés constituant une filière pour maximiser cette valorisation. Cependant, pendant des décennies, l'optimisation du traitement s'est concentrée uniquement sur l'amélioration des produits à haute valeur ajoutée au détriment de la qualité de la MO non transformée restante, appelée par la suite **Produits Résiduaire Organiques (PRO)**.

Dans un contexte de bioéconomie circulaire, l'optimisation de la qualité des produits issus de résidus organiques (tant l'efficacité agronomique et environnementale que l'innocuité) est une préoccupation majeure. Il est donc crucial de concevoir des bioprocédés favorisant un compromis adéquat entre les services attendus (i.e. dimensions agronomiques et écosystémiques, traitement des pollutions, et production d'énergie et/ou de molécules à haute valeur ajoutée). La prise en compte d'un tel compromis n'était pas inclus dans la conception et le contrôle des bioprocédés jusqu'à mon recrutement et l'établissement de ce nouveau sujet de recherche. Pour répondre à cette problématique, l'idée innovante de ma thématique de recherche est de proposer une approche d'**ingénierie inverse** et de concevoir une bioraffinerie environnementale en fonction des services rendus attendus et des besoins des agroécosystèmes ciblés (Figure 5).

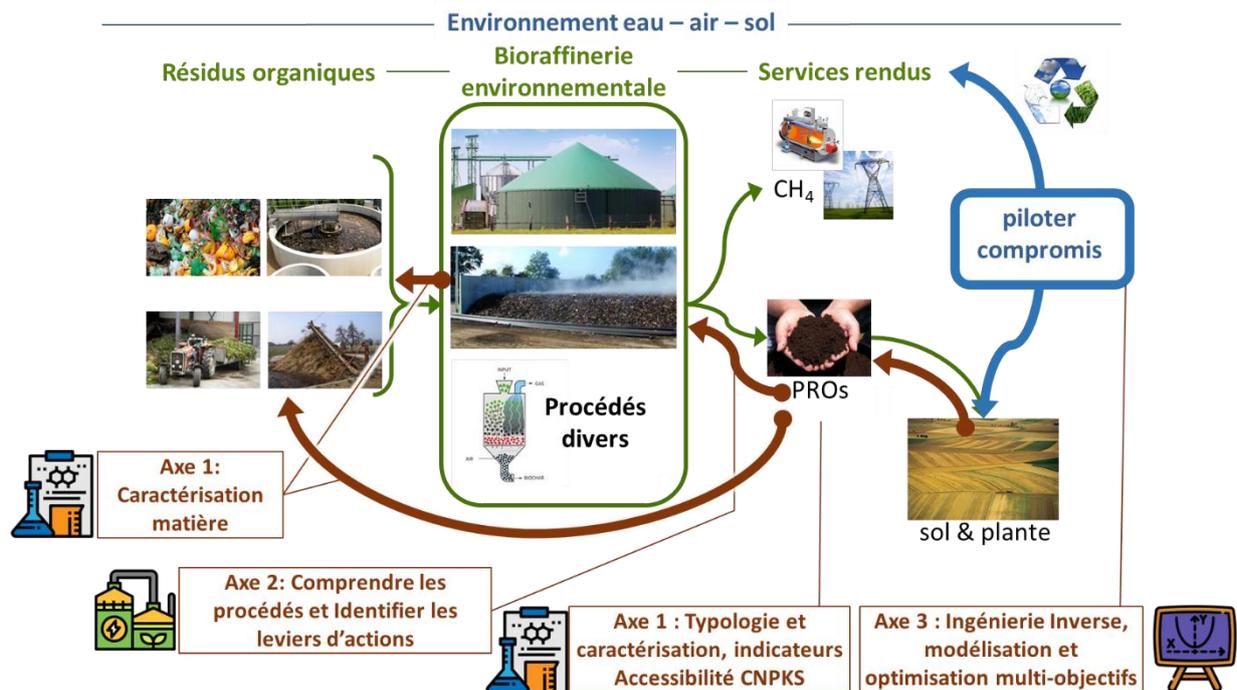


Figure 5 : Concept de l'« Ingénierie inverse » au service de la Bioraffinerie Environnementale et définition de ma stratégie de recherche

En effet, l'idée est de concevoir des filières de valorisation non plus à partir uniquement de la qualité des intrants mais également à partir des services rendus ciblés et du « cahier des charges » associé, dans une logique « produit ». Il s'agit donc d'un exercice d'optimisation multi-objectif, sous contraintes environnementales à la recherche de compromis entre services rendus.

Tout au long de ma carrière (cf. Chapitre 1), que ce soit pendant mon poste d'ingénieure de recherche à VEOLIA, ma thèse et mon post-doctorat au LBE, j'ai acquis et développé trois domaines d'expertises : la caractérisation de la matière, le génie des procédés et la modélisation des bioprocédés.

Afin de répondre aux enjeux associés à ma problématique de recherche, j'ai proposé une stratégie de recherche innovante et ambitieuse basée sur trois axes de recherche complémentaires (Figure 5) :

- (i) Vers une meilleure connaissance des résidus organiques et des produits résiduaux organiques via la caractérisation matière : comment les outils de caractérisation de la matière peuvent nous aider à mieux définir et comprendre leur potentiel de valorisation et l'identification de paramètres clés ?
- (ii) L'identification des leviers d'actions des procédés de valorisation : comprendre les mécanismes de transformation de la matière pour l'optimiser ;
- (iii) Optimisation de la conception de la Bioraffinerie Environnementale afin d'appliquer une stratégie d'ingénierie inverse, en utilisant la modélisation et l'optimisation multi-objectifs en fonction des besoins des agroécosystèmes.

L'axe 1 basé sur la caractérisation de la matière alimentaire à la fois l'axe 2 sur les procédés et l'axe 3 sur l'optimisation filière de valorisation. En effet, la connaissance de la matière permet de mieux comprendre les processus impliqués dans sa transformation dans les procédés via l'étude du devenir de cette matière au cours du temps mais également permet de définir des objectifs et/ou contraintes dans l'exercice d'optimisation. De même, l'axe 2 alimente directement l'axe 3. Une meilleure connaissance des procédés permet une meilleure modélisation de ces derniers afin d'identifier les leviers d'action possibles et les antagonismes vis-à-vis des services rendus et de réussir une conception de filière de valorisation optimale sous contrainte environnementale.

Ma thématique de recherche concernant la Bioraffinerie Environnementale est assez large du point de vue conception de filières, services rendus et procédés à considérer. J'ai choisi, dans un premier temps, de développer ma stratégie et ma démarche scientifique sur la filière de méthanisation, étant donné qu'elle répond aux enjeux scientifiques à la fois de la gestion des déchets et de la transition agroécologique. Cette filière est également source d'antagonismes et de complémentarités à définir et à comprendre afin d'être optimisée. L'identification des antagonismes et la gestion des compromis sont des enjeux clés pour optimiser à la fois la production d'énergie et celle d'engrais organiques. En effet, lorsque le devenir de la matière au sein d'un méthaniseur est étudié de plus près (Figure 6), il apparaît que la MO biodégradable en anaérobie est transformée en biogaz valorisable (selon les conditions procédés) et que la MO résiduelle peut être composée de plusieurs types de MO plus ou moins complexes.

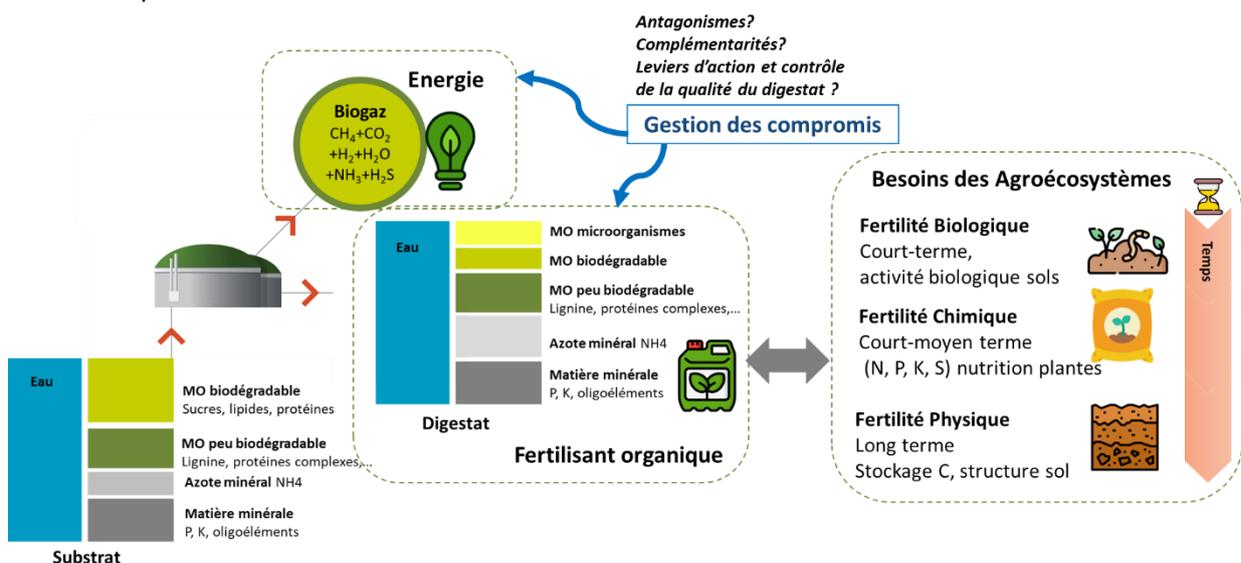


Figure 6 : Devenir de la matière pendant la méthanisation : application de ma thématique de recherche à la filière méthanisation et mes questions de recherches associées

Cette MO résiduelle est également intéressante dans les digestats puisqu'elle peut participer à favoriser la vie du sol et/ou améliorer la structure du sol selon sa qualité (plus ou moins labile/stable). Ainsi, un des antagonismes ou complémentarités à évaluer repose sur la qualité de la MO entrante en méthanisation et comment cette dernière est transformée par la biologie et va se comporter ensuite après épandage au sol. De même, les nutriments contenus dans les résidus organiques valorisés sont conservés lors de la méthanisation. Toutefois, certains éléments associés à des formes organiques (exemple : azote organique) subissent une minéralisation ayant pour conséquence une transformation d'éléments moins disponibles à disponibles et assimilables par les plantes (azote organique transformé en azote ammoniacal). Ce processus est une opportunité à saisir concernant le service rendu « fertilisant ». Or, certaines formes minérales comme l'azote ammoniacal peuvent être également inhibitrices de la méthanogénèse. Ainsi, un compromis entre bon fonctionnement du digesteur et production de fertilisants est à prendre en compte. Ce raisonnement est également valable pour d'autres éléments, plus ou moins inhibiteurs, tels que le soufre.

De plus, comme souligné dans la Figure 4, ma thématique de recherche s'inscrit à l'interface entre « Gestion des déchets organiques » et « Transition agroécologique » que l'on peut associer aux départements Transform et AgroEcoSystem de INRAE respectivement. J'ai donc relevé le défi de travailler à l'interface entre deux disciplines qui interagissaient rarement : le génie des procédés pour la valorisation des résidus organiques et l'agronomie. Ainsi, j'ai développé une stratégie de collaboration entre l'expertise du LBE en génie des procédés biologiques et des experts agronomes (issus d'INRAE et d'autres instituts de recherche nationaux et structures de recherche internationales). Cette stratégie de collaboration m'a permis de partager, renforcer et combiner mon expertise d'ingénierie inverse pour la conception de la bioraffinerie environnementale (Figure 7).

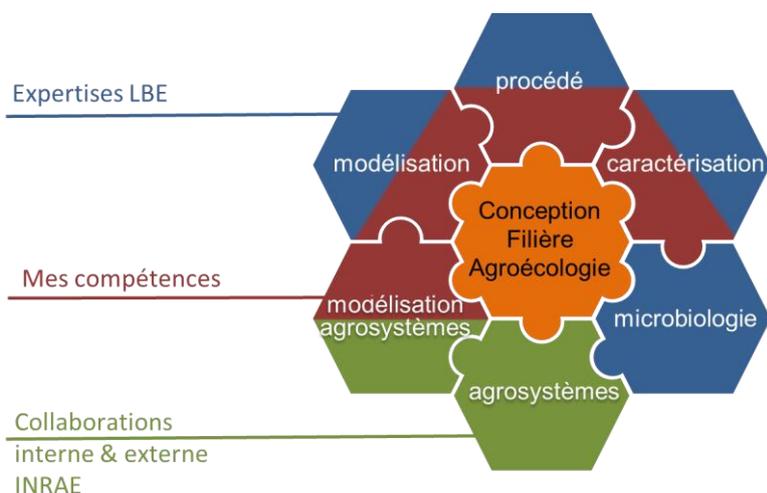


Figure 7 : Représentation schématique des collaborations mises en place durant mes activités de recherche complémentaires à mes domaines d'expertises

Ainsi, la structure de ce Chapitre suivra la logique de mes axes de recherche dans lesquels je décrirai les principales actions et les développements menés depuis le début de ma carrière à INRAE, rythmés par les diverses collaborations mises en place pour répondre à mes questions de recherche.

2. Axe 1 : Comment développer de nouveaux indicateurs pour optimiser la conception de la Bioraffinerie Environnementale ?

Au départ, mon expertise en matière de caractérisation de la matière était principalement axée sur la MO pour la modélisation des stations d'épuration, y compris la méthanisation dans un objectif de production d'énergie. Par conséquent, j'ai dû faire face au challenge d'étendre mes connaissances et concepts à d'autres éléments (N, P, K, S), pour décrire d'autres procédés et d'autres services rendus ce qui a considérablement élargi mes domaines d'application. Dès lors, dans mes premières années d'investigation, j'ai concentré mes efforts sur le développement de nouveaux indicateurs adaptés à ce nouveau domaine d'application.

2.1. Démarche scientifique

Objectifs

Une définition de l'ingénierie inverse ou rétro-ingénierie est la suivante : « *Pratique qui consiste à analyser un produit fini pour connaître la manière dont celui-ci a été conçu ou fabriqué* ». Cette définition brute met en évidence que pour concevoir un procédé visant à produire un produit fini, il faut non seulement partir dudit produit pour « remonter » les étapes de production mais également analyser sa composition.

La thématique principale de mon premier axe de recherche est la caractérisation de la matière. En effet, optimiser la conception de filières de valorisation de résidus organiques passe d'abord par la connaissance de la matière qu'ils contiennent afin de connaître leur potentiel valorisable. Le schéma de la Figure 8 présente la place de la caractérisation de la matière au sein de mes thématiques de recherche et les questions de recherche associées.

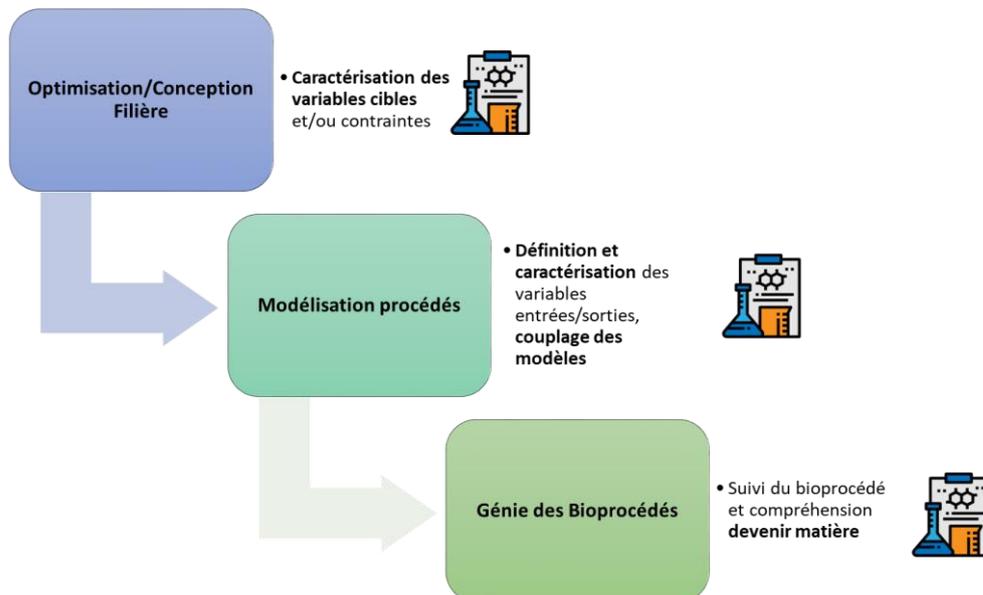


Figure 8 : Place de la caractérisation au sein de la démarche scientifique de ma thématique de recherche

Cet exercice d'optimisation tel que je le conçois passe par la mise en place de modèles de prédiction des performances et des services rendus de chaque procédé de la Bioraffinerie Environnementale afin de pouvoir générer des scénarios et optimiser les paramètres opératoires et succession de procédés selon un cahier des charges donné par les services rendus, comme par exemple les besoins des agroécosystèmes et la production de méthane.

Or, afin de modéliser les bioprocédés, il faut tout d'abord les comprendre afin de proposer des équations mathématiques susceptibles de reproduire les processus biologiques impliqués et pouvoir prédire l'impact de ces derniers sur la qualité de la matière entrante et leur potentiel valorisable. Cette étape ne peut être réalisée qu'à partir d'une définition pertinente des composantes de la matière à

biodégrader et donc d'une caractérisation associée mesurable. De même, afin d'atteindre les spécifications de qualité d'un produit, la définition de ces variables cibles mesurables expérimentalement est cruciale.

Dans le cas de ma thématique de recherche, j'ai choisi d'investiguer et de définir des variables communes et utilisables dans chaque bioprocédé jusqu'au devenir de la matière dans les sols afin de suivre le devenir de la matière. Ce choix aura également le mérite de répondre à la problématique autour de la modélisation de la filière via le couplage de modèles, que ce soit des modèles de procédés ou de sol/culture (cf. axe 3).

Ces variables devront être associées à des méthodes de caractérisation pertinentes permettant de décrire également les services rendus.

Définitions des concepts

La première étape a été d'identifier et de mettre en place des indicateurs pertinents capables de décrire les services rendus ciblés et les procédés impliqués dans la Bioraffinerie Environnementale : (i) qualité de la MO pour la conversion de la MO en méthane, (ii) stabilité du C, N, P, K, S, l'accessibilité et la disponibilité pour la production d'engrais organiques, (iii) la mobilité et la persistance des micropolluants (organiques, métalliques) et la survie des contaminants microbiens pour l'innocuité et (iv) les indicateurs d'impacts environnementaux.

Partant de cette stratégie, j'ai proposé d'associer chaque définition d'indicateur à des outils de caractérisation.

En effet, j'ai tout d'abord choisi d'identifier et de définir deux concepts que sont la **Bioaccessibilité** de la matière et sa **Biodisponibilité**, notions associées au concept de **Biodégradabilité** des MO dans les processus biologiques (digestion anaérobie, compostage, sol).

Tout d'abord, il est à noter que le type de résidus organiques à traiter, et notamment via la méthanisation a évolué depuis des décennies. En effet, au départ appliquée sur des eaux usées industrielles chargées en MO mais plutôt liquides, la méthanisation est désormais utilisée pour valoriser un très large panel de résidus organiques complexes, plus ou moins solides [JJ24].

Ensuite, basée sur cette précédente observation, l'étape limitante de la biodégradation des résidus organiques dépend de la nature de ces derniers. En effet, l'hydrolyse est l'étape limitante dans la biodégradation des molécules particulières ou solides (Vavilin et al., 1996; [JJ10]) étant donné que la structure physique de ces dernières est plus lentement accessible et donc hydrolysable. Cette notion de cinétique de biodégradation est cruciale dans le design de bioprocédés et le bon fonctionnement d'un bioréacteur. C'est pourquoi la compréhension et l'optimisation d'un procédé comme la méthanisation passe par la compréhension et l'optimisation de l'hydrolyse de la matière et de sa vitesse de biodégradation.

Si l'on étudie de plus près la biodégradabilité d'une eau usée par boues activées aérobie en réalisant de la respirométrie par exemple (Spérandio, 1998) ou encore celle d'un résidu organique par méthanisation via un test de potentiel méthane (BMP), les courbes expérimentales associées de vitesse de consommation d'oxygène et de vitesse de production de méthane (Figure 9) respectivement montrent qu'il existe plusieurs « fractions » de MO correspondant aux fractions hydrolysables et biodégradables de cette matière ((Yasui et al., 2006); [JJ27] et [JJ10]).

Les modélisateurs des processus biologiques impliqués dans les bioprocédés ont d'ailleurs inclus ce fractionnement de la matière à plusieurs reprises, que ce soit pour la modélisation des boues activées d'une station d'épuration via le modèle mécanistique Activated Sludge Model (ASM) (Henze et al., 2000; Spérandio, 1998), la modélisation de la digestion anaérobie via le modèle ADM1 (Batstone et al., 2002) et ses modifications (Vavilin et al., 2008; Yasui et al., 2006 ; [JJ28] et [JJ10]). Toutefois, il n'existe pas de méthodologie de caractérisation de cette matière qui fait consensus.

Le verrou existant alors réside dans la compréhension de ce fractionnement : quel est/sont le ou les concepts qui gouvernent le fractionnement de la matière en fractions plus ou moins hydrolysables et biodégradables ? Est-ce que ces fractions sont dégradées simultanément ou séquentiellement ?

Comment mesurer ces fractions afin de modéliser au plus juste les bioprocédés ?

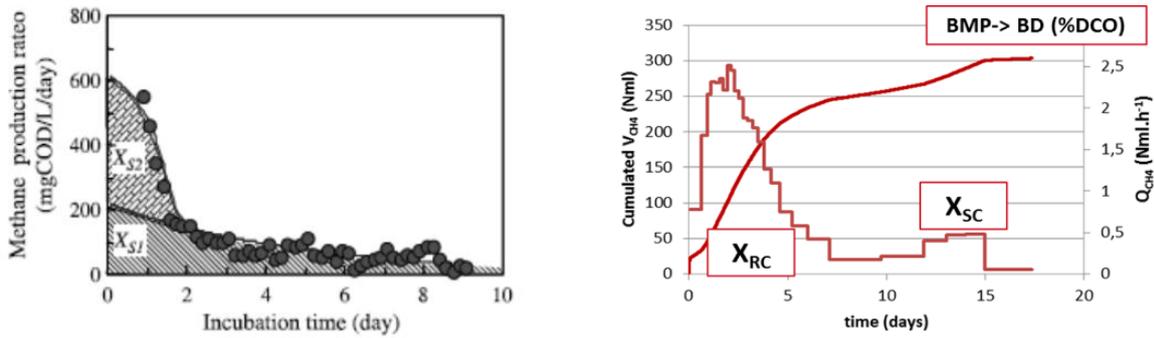


Figure 9 : Figures extraites de Yasui et al. (2006) et [JJ27]

Basé sur la définition proposée par (Aquino et al., 2008), j'ai entrepris dans le cadre de ma thèse d'abord [These_JJ] puis dans mes divers travaux de recherche par la suite ([JJ27], [JJ25], [JJ18] et [JJ10]) de répondre à ces questions, pour le procédé de méthanisation dans un premier temps, et de proposer les définitions suivantes schématisées par la Figure 10.

De manière vulgarisée, prenons deux fruits que sont la pêche et la noix de coco. Faisons l'hypothèse que ces deux fruits ont une valeur nutritionnelle similaire. Dans le cas de la noix de coco, cette valeur nutritionnelle n'est pas directement accessible car elle possède une coquille qui en limite l'accès et qu'il faut d'abord « enlever » alors que la même valeur nutritionnelle est directement accessible dans le cas d'un autre fruit tel que la pêche ou la pomme. Cette métaphore simpliste a le mérite d'introduire le concept de Bioaccessibilité. Ainsi les microorganismes contenus dans un système biologique ont un possible accès à certaines molécules organiques selon divers facteurs tels que leurs structures physiques, le temps de séjour dans le procédé, l'activité hydrolytique présente dans le système ou encore les pré-traitements appliqués. Ces molécules accessibles peuvent être biodisponibles si elles ont des caractéristiques suffisantes pour être consommées par les microorganismes (par exemple, si leur poids moléculaire (< 1kDa) leur permet de traverser la paroi cellulaire d'un microorganisme). Enfin, la biodégradabilité concerne la consommation à proprement parlé de la molécule si cette dernière n'est pas inhibitrice, si sa qualité le permet et si le système microbien possède les enzymes nécessaires.

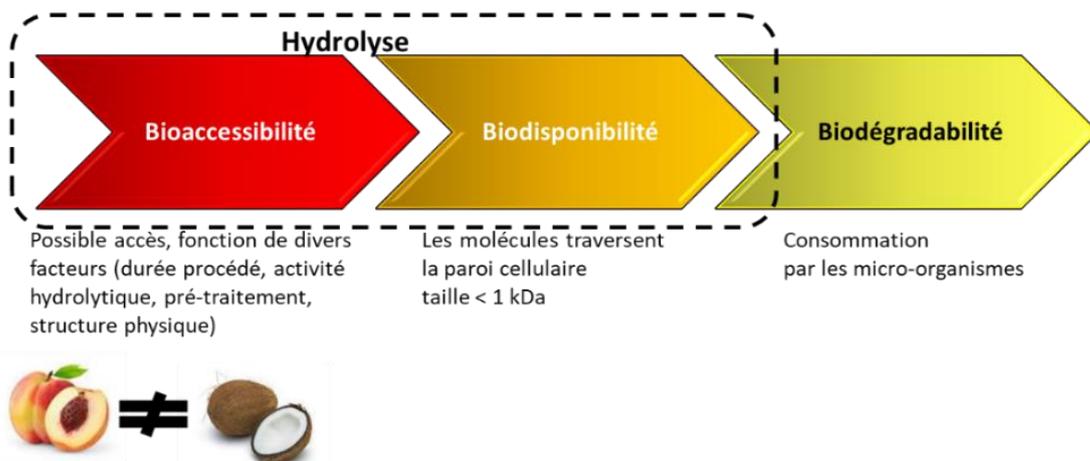


Figure 10 : Notions de Bioaccessibilité, Biodisponibilité et Biodégradabilité nécessaires à la description des processus de biodégradation dans un procédé biologique

Toutefois, la notion de bioaccessibilité seule ne permet pas de prédire la biodégradabilité des boues. En effet, comme cela sera décrit ultérieurement, le fractionnement développé dans ma thèse puis par

la suite (décrit et détaillé dans le paragraphe 2.2) permet de donner des tailles de compartiments plus ou moins accessibles associés à des cinétiques de dégradation différentes mais pas leur qualité en termes de molécules organiques. Par exemple, le fait de rendre bioaccessible la matière comme dans le cas d'un traitement thermique où une partie de la matière est solubilisée ne favorise pas systématiquement sa biodégradabilité car les molécules biodisponibles (glycoprotéines complexes issues des réactions de Maillard) ne sont pas consommables par les microorganismes [JJ26]. Ainsi, la notion de complexité de la matière est à associer à chaque fraction afin d'en prédire sa biodégradation.

Dans le reste de la section dédiée à l'axe 1, la biodégradabilité de la MO est considérée comme le résultat de la combinaison des deux concepts que sont la Bioaccessibilité de la MO (taille de compartiments) et la complexité de la MO (nature biochimique du compartiment), comme le montre le schéma proposé de la Figure 11.

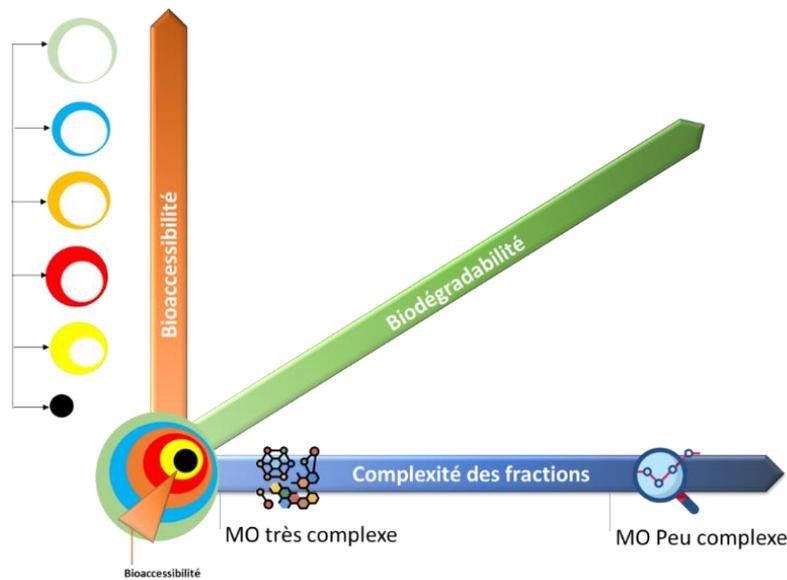


Figure 11 : Définition de la Biodégradabilité d'un intrant organique suivant deux axes : Bioaccessibilité (taille de compartiments) et Complexité de la MO des fractions (qualité)

Stratégie proposée

En suivant la méthodologie suggérée précédemment et en listant les services rendus à caractériser et les concepts associés, des méthodes de caractérisation pertinentes peuvent être proposées afin de créer des indicateurs. Par exemple la notion de biodégradabilité, que ce soit anaérobie dans un méthaniseur, aérobie dans un compost ou au sol, requière des tests biologiques expérimentaux trop coûteux en temps (tests d'incubation entre 30 et 300 jours) pour en faire des indicateurs de routine [JJ18]. Ces derniers doivent être pertinents, suffisamment descriptifs et rapides pour prédire la réponse biologique désirée. Enfin, une étape de validation des indicateurs est nécessaire vis-à-vis des réponses biologiques. Cette dernière peut être réalisée via des tests de biodégradation suivis dans l'application ciblée (par exemple au sein d'un méthaniseur, lors de tests de potentiel méthane, pendant le compostage ou encore dans le sol après épandage d'un produit).

La Figure 12 schématise cette stratégie appliquée à la conception optimale d'une filière de méthanisation pour la production concomitante d'énergie via le méthane, de MO utilisable à la fois pour la fertilité biologique et physique des sols et de nutriments. Pour chacun des services rendus, j'ai défini des notions comme la biodégradabilité de la MO, sa bioaccessibilité et complexité ou encore la disponibilité des nutriments pour le service rendu "fertilisant".

Ensuite, j'ai proposé des méthodes de caractérisation en tant que proxys de ces notions. La contrainte principale est que dans un but de modélisation de filière, les indicateurs doivent pouvoir décrire le devenir de la matière à la fois dans les bioprocédés mais également dans le sol. Enfin, l'étape de

validation expérimentale permet ou non de tester la qualité des indicateurs en tant que prédicteurs des références ou réponses biologiques. Si la validation est un échec, les indicateurs sont revus.

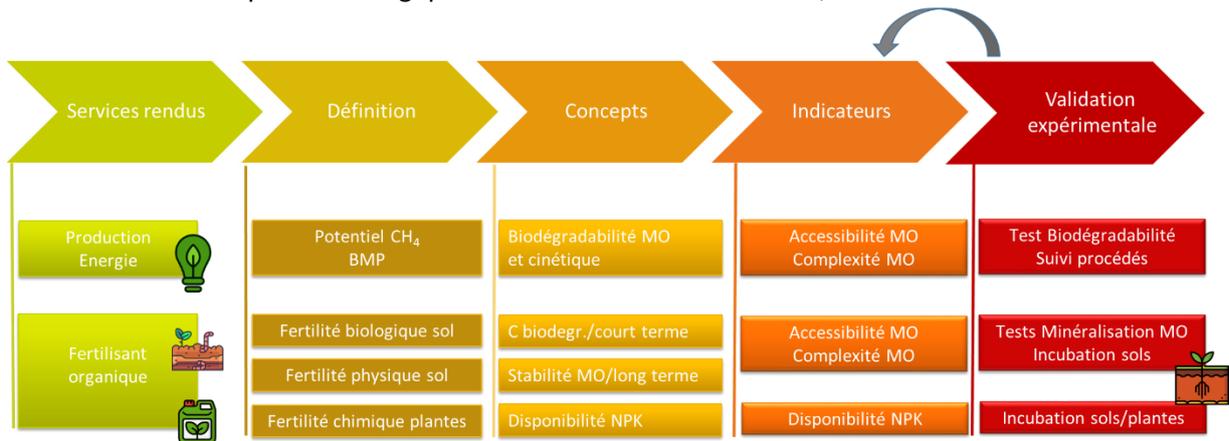


Figure 12 : Démarche suivie pour la définition des concepts associés aux services rendus et procédés à caractériser

Les paragraphes suivants reprennent la démarche proposée avec la description de mes travaux afin de définir et de développer des indicateurs de caractérisation pertinents, que ce soit pour la MO (2.2) ou pour décrire la disponibilité des nutriments (2.3). Enfin, une section est dédiée aux travaux pour la validation expérimentale de ces indicateurs (2.4).

2.2. Caractérisation de la matière organique et Indicateurs associés

Success Story « IsBaMO® »

Afin d'associer des indicateurs analytiques à ces concepts, j'ai travaillé à l'élaboration d'un fractionnement de la matière afin de décrire sa Bioaccessibilité lors de ma thèse (collaboration VERI/INRAE LBE) concernant le service rendu « production d'énergie ».

L'hypothèse de la méthodologie développée repose sur la simulation de la bioaccessibilité par l'accessibilité chimique de la matière. Pour ce faire, un protocole de fractionnement a été mis en place basé sur des extractions chimiques séquentielles. Le résidu organique ciblé étant les boues issues de station d'épuration (STEP), le protocole se base sur des extractions réalisées sur les boues afin d'en extraire des substances exo-polymériques (protéines, sucres, lipides et des substances humiques-like, provenant de la MO non biodégradable et/ou de la MO sécrétée par les microorganismes afin de conférer aux boues biologiques une structure de floc microbien, [JJ27]). La boue est d'abord centrifugée et filtré afin d'obtenir une première fraction appelée Dissolved Organic Matter (DOM). Sur la fraction particulaire, quatre extractions successives à l'eau mélangée à une solution de NaCl+NaHCO₃ à 4mM (afin de maintenir une force ionique adaptée et prévenir la rupture des parois cellulaires) sont réalisées (15 minutes, 200 rpm, 30°C), inspirées des travaux de (Esparza-Soto and Westerhoff, 2001) sur les extractions de substances exopolymériques (EPS). Sur le culot restant, quatre extractions successives d'un mélange de NaOH et NaCl à 10mM sont réalisées afin d'extraire les EPS faiblement liés aux floccs (Esparza-Soto and Westerhoff 2001) et enfin quatre extractions à la soude à 100mM visent à solubiliser et récupérer les substances humique-like après un prétraitement acide (HCl, 0.1M, 1h, 30°C) visant à précipiter les acides humiques comme préconisé dans les travaux de (Swift, 2018) et (Giovanela et al., 2004) sur les sols et sédiments. Après chaque extraction, les surnageants sont récupérés et représentent chacun une fraction de la matière. La fraction non extractible restante de la matière est supposée contenir la MO non accessible telle que la lignine insoluble à la soude ou les humines.

Une fois ce protocole testé et optimisé, j'ai appliqué ce dernier sur 52 boues d'origines variées et des expérimentations en réacteur pilote ont permis de mettre en évidence que l'accessibilité chimique des boues mimait leur bioaccessibilité [These_JJ], [JJ27].

Concernant la qualité de la MO contenue dans chaque compartiment, la seule connaissance des molécules biochimiques présentes (protéines, sucres, lipides totaux) ne permet pas de décrire leur complexité [These_JJ] et le fractionnement pour simuler la bioaccessibilité n'est pas suffisant pour prédire la biodégradabilité d'un échantillon de boues ou d'autres résidus comme montré dans [JJ27] et [JJ18]. Certaines de ces molécules sont en effet plus ou moins complexes et donc plus ou moins biodégradables.

Afin de caractériser la nature des fractions, j'ai choisi de travailler avec la spectrofluorimétrie en 3 dimensions (3D). En effet, mon objet d'étude étant les boues issues de station d'épuration, en particulier les boues biologiques, ces dernières sont composées en majorité de protéines. La fluorescence permet d'analyser qualitativement ces dernières ainsi que les produits microbiens et de mettre en lumière la complexité de la MO telle que les substances humiques ou encore les produits de la réaction de Maillard (i.e. glycoprotéines récalitrantes produites à haute température). En collaboration avec le LBE, une méthodologie d'analyse de la fluorescence a pu être développée et des indicateurs de complexité associés également [JJ26]. Un spectre de fluorescence en 3D permet de balayer plusieurs longueurs d'onde d'excitation et donc d'avoir une cartographie de la MO. Cette méthodologie a été associée au fractionnement précédemment décrit en réalisant un spectre de fluorescence sur chaque fraction extraite. La Figure 13 montre sur un exemple de caractérisation de boues que la signature de fluorescence est différente par fraction chimique et que la complexité évolue avec l'accessibilité chimique de ce résidu organique. Il est à noter que toutes les molécules organiques ne sont pas fluorescentes naturellement (telles que les acides gras ou encore les sucres).

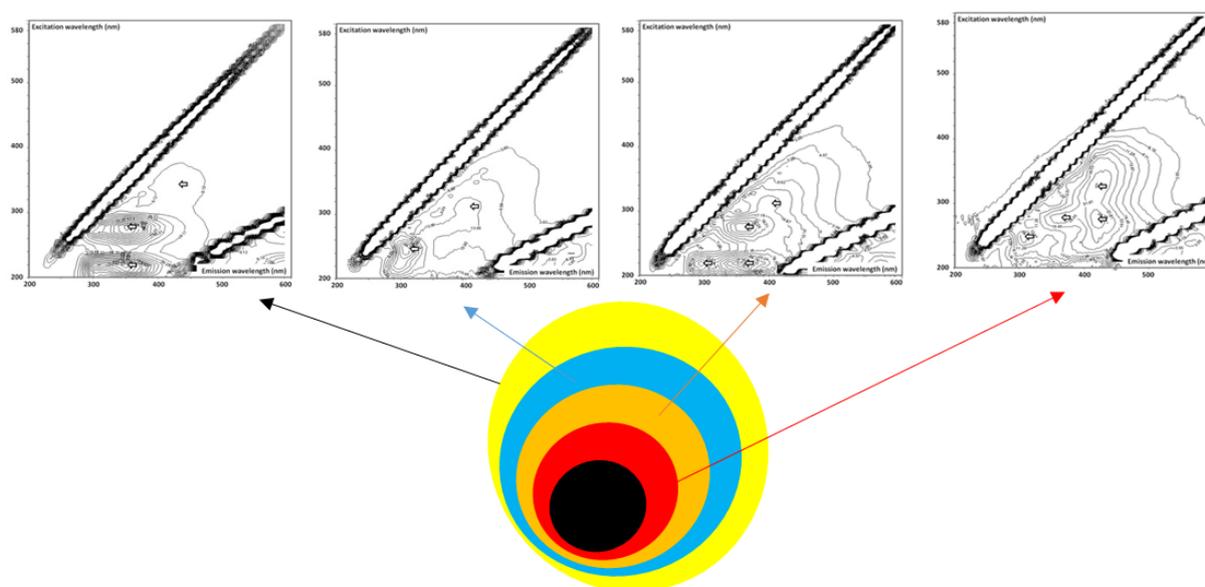


Figure 13 : Spectres de fluorescence 3D obtenus lors du fractionnement d'une boue [These_JJ]

Comme explicité ci-après, la combinaison des deux techniques d'analyses, à savoir les extractions chimiques séquentielles combinées à la fluorescence 3D a permis de prédire via des modèles statistiques la biodégradabilité anaérobie des boues et leurs fractions facilement hydrolysables [JJ27].

Concernant le traitement des spectres de fluorescence 3D, nous nous sommes basés sur les travaux de (Chen et al., 2003), et avons opté pour la régionalisation des zones de fluorescence. A partir de données issues de la littérature et de tests internes avec des molécules modèles, nous avons proposé une nouvelle régionalisation du spectre basée sur 7 zones [JJ26] comme décrite par la (Figure 14) du Fait Marquant 1. A partir du calcul de volumes de chaque zone (polygone) et de la zone des volumes de fluorescence, un pourcentage de fluorescence d'une zone est obtenu. Ce sont ces pourcentages, pour chaque zone et chaque fraction extraite que nous utilisons ensuite dans les modèles de prédiction.

N.B : d'autres techniques analytiques spectrales ont été testées sur l'analyse des extraits mais finalement mises de côté telles que la spectroscopie proche infra-rouge possible à réaliser sur des échantillons non humides et broyés. Cette technique s'est révélée très prometteuse afin de prédire la biodégradabilité des résidus organiques non fractionnés, que ce soit pour le potentiel méthane (Lesteur et al., 2011; [JJ19]) ou la minéralisation du carbone organique au sol (Peltre et al., 2011) sur des échantillons totaux. Toutefois, l'associer au fractionnement signifie réaliser le spectre sur les résidus solides de chaque extraction et non sur chaque extrait (liquide) et les premiers tests réalisés n'ont été que peu concluants.

Lors de mes premières activités à INRAE, un des premiers challenges à relever a été d'élargir le panel de résidus organiques (urbains et agricoles, au-delà des boues) ainsi que d'élargir les procédés et services rendus associés, à savoir considérer la filière méthanisation dans son ensemble (valorisation énergétique et agronomique) via les bioprocédés de méthanisation et compostage et la considération du retour au sol des Produits Résiduaux Organiques (PRO) associés. Ceci implique d'étudier et de définir les besoins des agroécosystèmes en termes de MO puis de nutriments. Toutefois, fait intéressant, les concepts définis précédemment et qui ont permis le développement d'un nouvel indicateur, rejoignent ceux de la description des engrais organiques. En effet, d'un point de vue agronomique, l'accessibilité et la stabilité de la MO sont cruciales pour mieux gérer la fertilité des sols, sommant la fertilité biologique (via une MO labile qui active la biologie du sol) et la fertilité physique (via une valeur d'amendement élevée et un stockage du C organique permettant l'amélioration de la structure du sol). Ainsi, les indicateurs associés aux nouveaux services rendus élargis, reprennent les méthodologies développées pendant ma thèse, notamment le fractionnement pour mimer la bioaccessibilité et la fluorescence pour évaluer la complexité de la MO.

Afin d'élargir la méthodologie au panel de résidus organiques variables, j'ai dû adapter la méthodologie et la tester puis la valider afin de pouvoir prédire à la fois le potentiel méthane de ces résidus (en plus des boues) et prédire le devenir de la MO de ces résidus dans d'autres bioprocédés que la méthanisation ainsi que leur devenir après épandage au sol.

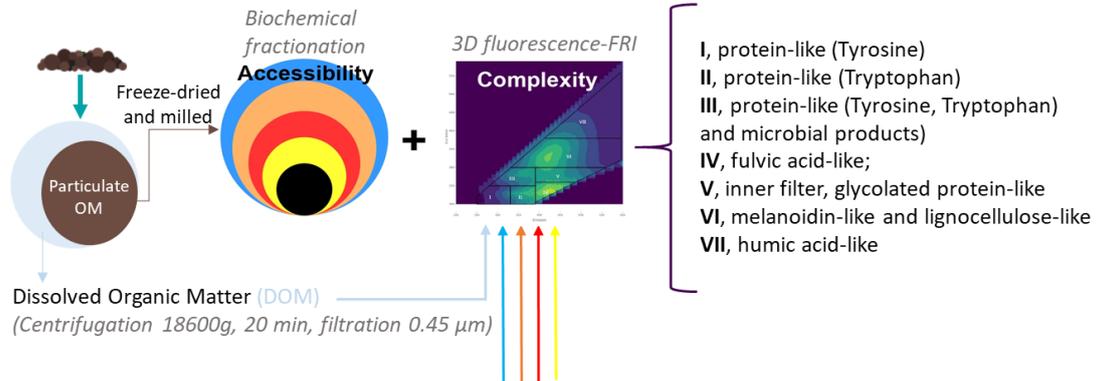
Pour cela, je me suis inspirée d'une autre technique analytique de fractionnement de la matière appliquée à la caractérisation des fibres pour prédire la digestibilité des fourrages (Van Soest, 1963). Cet indicateur a déjà été utilisé pour prédire la biodégradabilité anaérobie de certains résidus lignocellulosiques (Bayard et al., 2018; Gunaseelan, 2007; Liu et al., 2015; Triolo et al., 2011) et la minéralisation du carbone au sol de résidus organiques riches en fibres (résidus agricoles, composts) via un indice de stabilité de la MO (ISMO) décrit par (Lashermes et al., 2009). Toutefois, comme montré par (Mottet et al., 2010 ; [JJ25] ; [JJ15]) ce protocole n'est pas suffisamment fin pour décrire les fractions facilement disponibles puis accessibles, que ce soit pour le carbone ou l'azote car les extractants chimiques sont trop agressifs.

Ainsi, en combinant le fractionnement appliqué aux boues, ciblant l'extraction de matière facilement bioaccessibles riches en sucres, protéines puis en substances humiques-like, avec le fractionnement Van Soest ciblant les fibres, nous avons ajouté l'extraction à l'acide sulfurique 72% afin de considérer les hemicelluloses et celluloses (holocelluloses) biodégradables afin de les différencier de la lignine restant dans la fraction non extractible, peu biodégradable en anaérobie et agissant comme une barrière protectrice limitant l'accessibilité de la matière (Bayard et al., 2018; [JJ10]).

Il est à noter que depuis 2019, le fractionnement a été automatisé afin de réduire le temps de manipulation, le nombre d'étapes et les erreurs de manipulation via l'utilisation de l'ASE 350 (Accelerated Solvent Extractor, Thermofisher). Le développement et le nouveau protocole sont en cours de valorisation. Une déclaration d'invention est un transfert au catalogue analytique de INRAE Transfert Environnement ont été réalisés comme en témoigne l'encadré suivant dédié à ce fait marquant (Fait Marquant 1).

Fait Marquant 1 : Développement de la marque IsBaMO®, déclaration d'invention et transfert au catalogue analytique INRAE Transfert Environnement

Un nouveau développement [JJ24] et l'établissement de base de données via divers projets dans lesquels j'ai participé (cf. Chapitre 1) ont donné lieu à la naissance à IsBaMO® (marque déposée), un indicateur de stabilité et de bioaccessibilité de la MO comme illustré dans la Figure 14. Une déclaration d'invention [DIRV_1] a ensuite permis de transférer la méthode dans le catalogue d'IT-E (INRAE Transfert Environnement, Business Unit de INRAE adossée au LBE) afin de le proposer en prestation analytique.



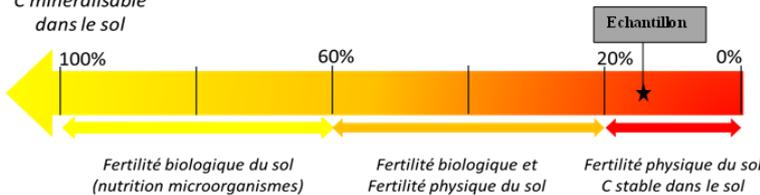
- (1) Extractable Soluble from Particulate Organic Matter (SPOM) → $CaCl_2$, pH = 2, T = 30 °C x 2 (3h) → EPS, proteins, sugars
- (2) Readily Extractable Organic Matter (REOM) → NaOH 10 mM, pH = 10, T = 30 °C x 4 (15min) → Proteins, lipids
- (3) Slowly Extractable Organic Matter (SEOM) → NaOH 0.1 M, pH = 14, T = 30 °C x 4 (1h) → Complex proteins, Humic acid-like
- (4) Poorly Extractable Organic Matter (PEOM) → H_2SO_4 72% w:w, pH = 2, T = 30 °C x 2 (3h) → Cellulose, hemicellulose
- (5) Non-Extractable Organic Matter (NEOM) → Residual OM → non-accessible OM

Figure 14 : Protocole schématisé de l'indicateur IsBaMO®

Les résultats proposés dans le cadre de la prestation sont : (i) l'estimation concomitante du potentiel méthane BMP (NmLCH₄/gMV) ainsi que le potentiel Carbone minéralisable au sol de l'échantillon via les modèles de régression proposés dans [JJ18] et le positionnement de l'échantillon dans un référentiel issu de la base de données d'échantillons du LBE, suivant les axes complexité (somme pondérée calculée à partir de la taille en DCO de chaque fraction et de son indice de complexité) et accessibilité (somme des fractions extraites en pourcentage de DCO) comme le montre un exemple extrait d'une analyse réalisée sur la Figure 15.

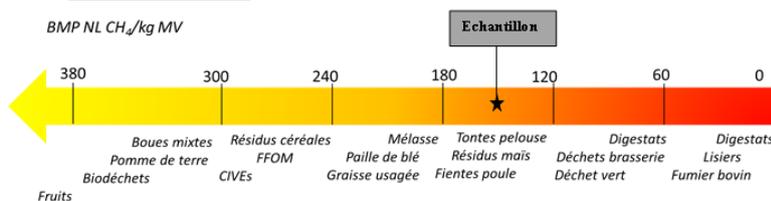
- Devenir dans le sol :

C minéralisable dans le sol



- Devenir en méthanisation :

BMP NL CH₄/kg MV



- 1 Digestat lisier, composts digestats boues, sol, boues séchées
- 2 Composts boues, Boues+déchets verts, digestats boues, digestats lisiers +co-substrats
- 3 Sol, Terreau, Fumiers/lisiers, digestats fumiers bovins
- 4 Digestats phases solides, composts FFOM et composts biodéchets
- 5 Boues, intrants méthanisation agricole, FFOM, fientes, biodéchets, digestats liquides
- 6 Digestat maïs ensilé, digestat lisier+grasses, compost fumier
- 7 Composts boues, fumier

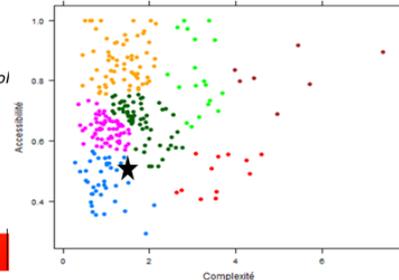


Figure 15 : Résultats proposés suite à l'analyse IsBaMO®

2.3. Devenir des nutriments au sein des procédés de valorisation

Un autre défi relevé a été la caractérisation des nutriments afin de décrire l'accessibilité et la disponibilité de ces derniers pour les plantes. En effet, un des services rendus à définir est celui de la production de fertilisant organique riche en nutriments (NPKS) pouvant substituer totalement ou en partie les engrais chimiques dont la production a un impact environnemental négatif et dont certains voient leur gisement s'appauvrir, comme le phosphore. Les deux macroéléments nutritifs majeurs et essentiels pour la croissance des plantes auxquels je me suis intéressée sont l'azote et le phosphore. Nécessaire à la croissance des pousses et des feuilles, l'azote est un constituant fondamental des protéines et de la chlorophylle (Unifa). Cet azote est assimilable sous forme minérale (azote ammoniacal ou nitrate). Comme précédemment évoqué, les PROs tels que les digestats sont riches en azote minéral puisque la méthanisation implique la minéralisation de l'azote organique. Toutefois, des enjeux autour du devenir de l'azote existent au sein du procédé et en tant qu'impact environnemental. L'azote organique est minéralisé lors de la méthanisation sous forme d'azote ammoniacal assimilable par les plantes. Or, cette forme d'azote inhibe également la méthanogénèse. C'est pourquoi une meilleure connaissance de la minéralisation de l'azote organique apporterait une gestion meilleure du procédé quant à la production de méthane et de fertilisants. Concernant l'azote minéral apporté dans le sol, une mauvaise gestion du ratio stoechiométrique C/N pourrait mener à une immobilisation de l'azote par les microorganismes du sol, phénomène connu comme « faim d'azote » (Lashermes et al., 2010). De plus, en termes d'impacts environnementaux, des risques de volatilisation de l'azote ammoniacal pendant le stockage des digestats et pendant leur épandage dans certaines conditions (pH, climatiques, type de sol, pratiques agricoles) mènent à une perte azotée et à une pollution participant indirectement aux émissions de GES (Reibel and Leclerc, 2018). De plus, une meilleure connaissance du devenir de l'azote après production par le procédé peut également prévenir d'autres sources d'émissions comme le protoxyde d'azote, puissant GES (équivalent à 264 tonnes de CO₂ produit sur 100 ans) produit lors de la nitrification de l'azote ammoniacal en autotrophie et lors de la dénitrification ou encore la lixiviation des nitrates produits lors de la nitrification dans le cas d'une mauvaise gestion de l'épandage menant à une eutrophisation des eaux.

Le phosphore quant à lui stimule la floraison et la fructification ainsi que la croissance racinaire, il améliore la résistance au gel et est au cœur du métabolisme énergétique de la plante. Son principal rôle à l'intérieur de la plante est lié au stockage et transfert d'énergie (ATP), à la formation de composés structuraux (nucléotides, acides nucléiques, coenzymes, phospholipides, etc...) intervenant dans la croissance des racines, la formation des grains, fruits et fibres, la maturation des fruits et le pouvoir germinatif des semences (Unifa). Une carence en phosphore inhibe la croissance des plantes. Or cet élément voit ses réserves mondiales s'appauvrir ce qui aura un impact important sur la sécurité alimentaire. Ainsi, l'enjeu autour du recyclage du phosphore dans un objectif de bouclage de cycle est de premier plan. Tout comme le nitrate, le phosphore minéral sous forme de phosphate peut être source d'eutrophisation des eaux via la lixiviation si une mauvaise gestion de l'épandage (doses et climat) est réalisée. Concernant le devenir du phosphore dans les procédés, ce dernier est conservé. Lors de la méthanisation, selon les conditions physico-chimiques, une partie peut être précipitée [JJ09] et, selon la composition du digestat, le phosphore peut-être plus ou moins disponible selon s'il est lié avec des sels ou des métaux [JJ07]. En effet, il est en forte interaction avec la phase solide et forme divers composés minéraux secondaires avec Ca, Fe, Mn, Al. Facilement adsorbable, sa disponibilité est également une problématique à comprendre. De plus, tout comme l'azote minéral, le phosphore peut être immobilisé par l'activité biologique des sols.

Concernant le potassium, ce dernier joue un rôle important dans l'équilibre hydrique des plantes, améliore leur stabilité ainsi que la qualité des fibres et augmente la résistance au froid des cultures. Une carence en potassium perturbe l'équilibre hydrique des végétaux et entraîne le flétrissement des feuilles. Les plantes sont également plus sensibles aux maladies. Toutefois, présent dans la phase soluble des digestats, sa disponibilité n'est pas limitante.

J'ai d'abord commencé à travailler sur l'azote en associant l'IsBaMO® à l'analyse de l'azote organique

et minéral. Concernant le devenir de l'azote en méthanisation, j'ai collaboré à un encadrement de thèse avec l'unité de recherche OPAALE (INRAE). En partageant mon expertise sur l'indicateur IsBaMO[®], ce dernier a été utilisé avec succès pour décrire l'accessibilité et la disponibilité de l'azote dans la méthanisation comme publié dans [JJ15]. Dans cette étude, nous avons mis en évidence que l'azote organique contient des fractions de bioaccessibilité très élevée à très faible, comme pour le carbone. Deux groupes de substrats de méthanisation ont été déterminés sur la base des données de biodégradabilité de C et N, séparés par une valeur de leur ratio azote ammoniacal sur azote total de 30%. Ce ratio traduit le degré de minéralisation de l'azote organique. Dans le cas d'un ratio supérieur à 30% (fumiers, lisiers), les biodégradabilités du C et N sont très significativement différentes (i.e. la biodégradabilité de l'azote organique étant bien plus faible) alors que pour un ratio inférieur à 30% (résidus de récolte, déchets agro-industriels non stockés) les biodégradabilités sont similaires et plus élevées. Dans le premier cas, cela veut dire que l'on ne peut prédire correctement la biodégradabilité de l'azote organique à partir de la seule valeur de biodégradabilité du carbone organique. De plus, l'analyse de la bioaccessibilité réalisée via le fractionnement IsBaMO[®] montre que la bioaccessibilité du C est similaire entre les deux groupes alors que celle de l'azote est très différente, mettant en lumière qu'un degré de minéralisation élevé se traduit par une faible accessibilité de l'azote organique déjà minéralisé avant la méthanisation. La comparaison des fractionnements IsBaMO[®] et Van Soest (Van Soest, 1963) a été réalisée en parallèle et les résultats ont montré que l'utilisation du fractionnement IsBaMO[®] était plus adéquat pour décrire la bioaccessibilité de l'azote organique, les extractants Van Soest étant plus agressifs et moins spécifiques. Les fractions azotées issues de IsBaMO[®] ont ensuite été utilisées pour prédire la biodégradabilité anaérobie de l'azote organique, montrant l'adéquation d'un tel indicateur avec les descriptions des phénomènes observés [JJ15].

Pour aller plus loin, j'ai souhaité apprendre les techniques expérimentales de laboratoire propres aux sciences du sol et tester l'indicateur IsBaMO[®] pour décrire l'absorption de l'azote et du phosphore par les plantes. Pour cela, j'ai développé une collaboration avec le département d'agronomie de l'Université de Bologne en Italie en 2017 pour travailler sur ce sujet. J'ai ainsi proposé un projet (NutProPlant, cf. Chapitre 1) et ai obtenu deux bourses pour réaliser un séjour dans ce laboratoire, et acquérir également une première expérience internationale. J'ai donc partagé mes connaissances en caractérisation via l'indicateur IsBaMO[®] développé et l'ai appliqué à l'azote organique et minéral pour décrire l'accessibilité de l'azote contenu dans dix digestats de méthanisation provenant de diverses sources. Mon collègue italien a quant à lui partagé son expertise en termes d'expérimentations via des incubations sur sol (avec et sans plantes) ainsi que son expertise en chimie du phosphore dans le sol, notamment via le protocole d'extractions chimiques séquentielles (Dou et al., 2000; Grigatti et al., 2015) ainsi que des analyses en diffraction aux rayons X afin d'évaluer les phases cristallines des digestats et leur impact sur la disponibilité du phosphore.

Pour la première fois, l'utilisation et la comparaison de ces protocoles (Figure 16) à la fois pour décrire l'accessibilité de la MO, l'azote et le phosphore de dix digestats d'origines diverses ainsi que pour caractériser la disponibilité de ces nutriments pour les plantes ont été réalisées et publiées. Cette étude a mené aux conclusions suivantes [JJ07] :

- Les teneurs en azote et phosphore total ne sont pas suffisantes pour prédire la quantité de nutriments assimilables par la plante : un indicateur de disponibilité de ces nutriments est nécessaire pour parvenir à une gestion contrôlée de la fertilisation ;
- Le devenir de l'azote dans le sol dépend énormément du degré de minéralisation de l'azote organique réalisée pendant les processus de biodégradation de la MO. Ce degré de minéralisation est très fortement corrélé avec le ratio C/N qui représente le caractère fibreux d'un résidu. Plus ce ratio est élevé, plus le risque d'immobilisation de l'azote (faim d'azote) est élevé comme décrit par (Lashermes et al., 2010);
- IsBaMO[®] est par conséquent adapté à la description du devenir de l'azote organique dans le sol ;

- Le devenir du phosphore dans le sol dépend surtout des conditions physico-chimiques du sol et le phosphore organique est très minoritaire dans les digestats et, de manière générale, dans les résidus organiques ;
- Le phosphore peut être rendu non accessible si certains composés tels que le calcium ou les métaux (fer ou aluminium) sont présents, s'associant avec lui ;
- IsBaMO® et ses extractants ne sont pas adaptés à la description du devenir du phosphore dans le sol contrairement au protocole de Hedley modifié (Grigatti et al., 2015) ;
- La typologie des digestats (reliée à la provenance des intrants) a une influence sur la qualité de la spéciation de N et P et donc sur les résultats obtenus en incubation.

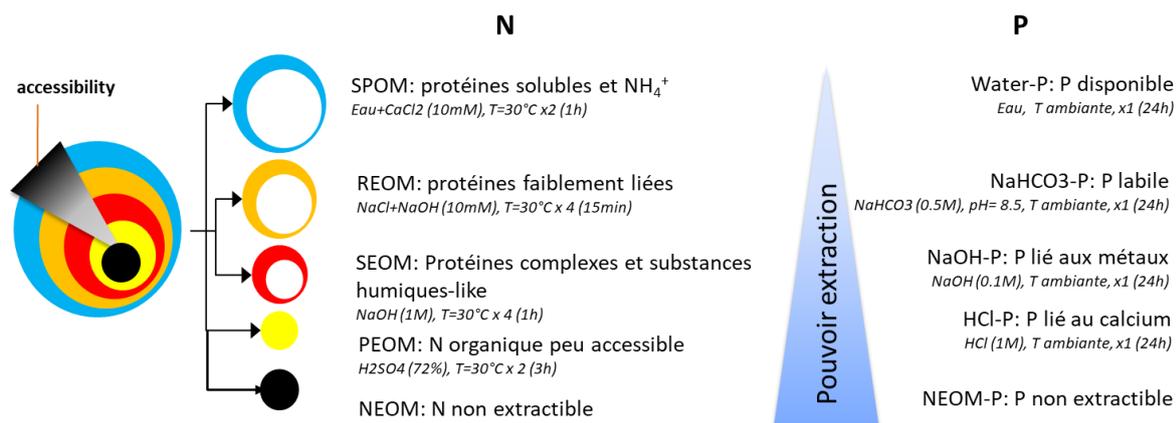


Figure 16 : Protocoles testés pour déterminer l'accessibilité et disponibilité de N et P basés sur [JJ25] pour N et (Grigatti et al., 2015) pour P

Bien que le devenir de la bioaccessibilité de l'azote ait été étudié au même titre que le C et la MO en général au sein des bioprocédés et plus récemment après épandage, le devenir du phosphore n'a été étudié que dans la partie « sol ». De plus, d'autres nutriments intéressants et participant aux antagonismes/complémentarités entre méthanisation et épandage des produits résiduaux organiques comme le soufre n'ont pas été abordés et ne sont que peu étudiés de manière générale.

3.4. Validation expérimentale de la pertinence des indicateurs

Afin de valider expérimentalement la pertinence des indicateurs de caractérisation développés pour décrire les divers services rendus, plusieurs techniques ont été utilisées. L'axe 2 reviendra notamment sur la pertinence de leur utilisation pour décrire les processus biologiques internes aux bioprocédés. Dans cette section, je parlerai essentiellement de la validation réalisée via (i) des expérimentations dédiées à l'étude de l'hydrolyse de la MO à l'aide du fractionnement IsBaMO® et (ii) le potentiel prédictif de l'IsBaMO® vis-à-vis de réponses biologiques de références à l'aide de modèles statistiques développés. Un fait marquant (Fait Marquant 2) issu de l'étude du suivi des fractions IsBaMO® obtenues sur un fumier mis en incubation dans un sol clôturera ce paragraphe.

Validation expérimentale du concept de Bioaccessibilité et de l'indicateur IsBaMO®

Lors d'une collaboration avec la thèse de Cyrille Charnier (LBE), nous avons mis en place une expérimentation dont le but était d'en apprendre plus sur les mécanismes de l'hydrolyse afin d'améliorer sa modélisation (aspect détaillé dans l'axe 3) et notamment élucider une question récurrente sur le sujet qui n'a jamais trouvé de consensus : l'hydrolyse des fractions constituant la MO d'un résidu organique est-elle séquentielle ou simultanée ?

Pour cela, nous avons utilisé le fractionnement d'IsBaMO® et l'avons appliqué à divers substrats tels qu'une pomme, une paille de blé et une boue de STEP.

Nous avons mis chaque substrat total et dépourvu d'une à plusieurs fractions accessibles à incuber en conditions anaérobies. Les résultats ont montré que, dans le cas de la pomme, la cinétique et le potentiel méthane décroît au fur et à mesure que l'accessibilité décroît et que les fractions accessibles sont enlevées. Ce résultat est observé pour la paille et les boues sur les premières fractions enlevées. Toutefois, pour ces deux substrats, le résidu mis à incuber après l'attaque à la soude (après la fraction SEOM), voit sa cinétique augmenter et son potentiel méthane au même niveau que le potentiel méthane du total (Figure 17). Les hypothèses proposées pour expliquer cela sont que la soude solubilise les barrières « physiques » constituant la paille et les boues, à savoir respectivement une paroi ligneuse et la structure en floc bactérien basée sur des EPS libérant ainsi un matériel biodégradable rendu bioaccessible par l'extraction.

Ainsi, cette expérimentation met en évidence que selon la nature du substrat et sa structure, la biodégradabilité diminue avec la bioaccessibilité dans certains cas (pomme) mais que des fractions peu accessibles peuvent être biodégradables si cette accessibilité est atteinte comme dans le cas des boues et de la paille. Ces deux exemples sont assimilables à la métaphore de la pêche et de la noix de coco abordée en début de chapitre. Ainsi le concept de bioaccessibilité est crucial et permet de comprendre le fonctionnement de la biodégradation des résidus organiques et de le modéliser (axe 3). L'indicateur IsBaMO® a été très utile afin de mettre en évidence ce résultat.

Des questions restent toutefois en suspens concernant la prise en compte de l'impact des réactifs chimiques sur la structure moléculaire des fractions restantes après extraction. Toutefois, comme explicité par la suite, l'IsBaMO® reste avant tout un indicateur permettant de représenter la matière. Ces résultats font partie d'une publication dédiée à la modélisation des mécanismes de l'hydrolyse détaillée dans l'axe 3.

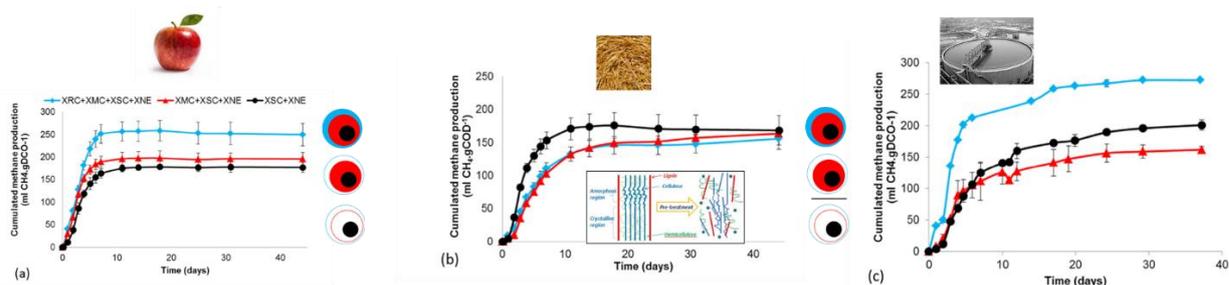


Figure 17 : Résultats obtenus sur l'étude des mécanismes de l'hydrolyse de divers substrats via l'utilisation du fractionnement IsBaMO [JJ10]

Pour aller plus loin et valider l'utilisation de l'IsBaMO® pour décrire le devenir de la MO tout au long d'une filière de valorisation de résidus, une collaboration avec INRAE SAS a été mise en place.

Les résultats issus d'une expérimentation dédiée au suivi de la biodégradation de la MO d'un fumier dans le sol en utilisant l'IsBaMO® est résumée dans le Fait Marquant 2.

Prédiction des réponses biologiques vis-à-vis de l'IsBaMO®

A partir des nombreuses caractérisations réalisées pendant ma thèse, puis mon post-doctorat et plus largement pendant mes sept premières années de recherche à INRAE, j'ai pu établir des bases de données contenant la description des résidus organiques associés souvent aux réponses biologiques que l'on cherche à décrire.

Ainsi, pendant ma thèse, j'ai caractérisé 52 boues de STEP (boues biologiques, primaires et digérées) par la méthode combinée du fractionnement de la bioaccessibilité et de la fluorescence 3D. En parallèle, j'ai effectué des tests de potentiel méthane (tests de biodégradabilité en conditions anaérobie) afin de déterminer le taux de MO biodégradable et en identifiant les courbes de vitesse de production de méthane, j'ai pu également évaluer les fractions rapidement et lentement biodégradables de la MO.

A partir de cette base de données, j'ai réalisé des tests statistiques (tests de régression Partial Least Square, PLS) afin de trouver des corrélations entre les diverses variables et de prédire à la fois la biodégradabilité totale et les fractions rapidement/lentement biodégradables. Des modèles PLS de bonne qualité ont été réalisés et publiés [JJ27], avec des erreurs de prédiction entre 6 et 9%. Le schéma de la Figure 18 résume les résultats obtenus en analysant le poids des variables sur les modèles venant compléter mon questionnement scientifique de la Figure 11.

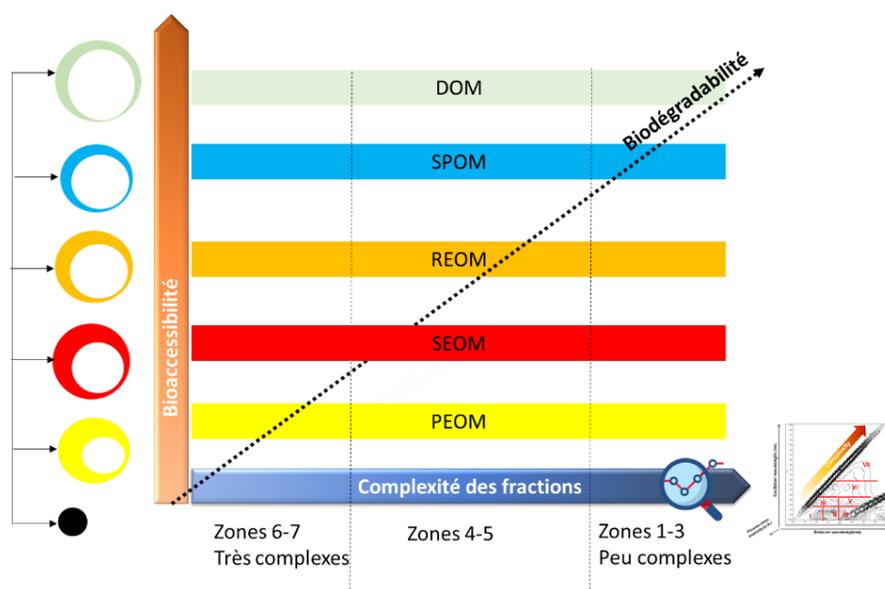


Figure 18 : Variables explicatives pour prédire la cinétique de biodégradabilité anaérobie des boues de STEP (adapté de [JJ27])

Par la suite, en modifiant le protocole et en développant l'indicateur IsBaMO[®], une nouvelle base de données s'est constituée. De la même façon qu'auparavant, les réponses biologiques expérimentales associées ont été également obtenues au LBE ou via des collaborations à travers les divers projets abordant la thématique de caractérisation (cf. Chapitre 1).

Ainsi, dans un premier temps, une analyse statistique sur 60 données de caractérisation (bioaccessibilité et complexité) ont mis en évidence que l'IsBaMO[®] permettait de classer les résidus organiques selon leur nature [JJ25]. En effet, cinq groupes principaux ont été obtenus : (i) les boues et substrats très biodégradables (pommes de terre, résidus alimentaire,...) associés avec une très forte bioaccessibilité et des zones de fluorescence simples, (ii) les digestats de boues, riches en fractions bioaccessibles intermédiaires et des niveaux de fluorescence plus complexes que le premier groupe, (iii) les résidus lignocellulosiques (FFOM, déchets verts, fumiers, ...) associés à des fortes fractions en SEOM et PEOM et des zones de fluorescence complexes (lignocellulose-like), (iv) les composts associés à des fractions très faiblement accessibles (PEOM et NEOM) et composés de zones de fluorescence complexes (lignocellulose-like) et (v) les sols et terreau associés avec la plus faible bioaccessibilité, une forte non extractabilité et des zones de fluorescence complexes dans certaines fractions (acides-humique-like). Ces résultats ont montré la pertinence de l'indicateur à représenter la diversité de résidus organiques et à les classer.

Dans un second temps, cette base de données élargie à un large panel de 82 résidus très variés a été utilisée pour prédire le potentiel méthane de ces derniers (gamme située entre 31 à 394 NmL CH₄.MO⁻¹), BMP déterminés selon (Angelidaki and Sanders, 2004) et 44 échantillons ont permis la prédiction du carbone organique minéralisable au sol selon la norme XPU 44-163 (gamme située entre 7 et 46% de Carbone organique) à l'aide de modèles PLS [JJ18].

Les modèles ont été testés sur les données avec et sans fluorescence et les résultats montrent que les deux modèles sont beaucoup plus robustes et de bonne qualité avec l'information de la complexité, preuve que seule l'information de la bioaccessibilité n'est pas suffisante (Figure 19).

Enfin, l'analyse de sensibilité des variables sur les modèles a permis d'évaluer statistiquement le poids de ces dernières sur la prédiction du potentiel méthane (BMP) et du carbone minéralisable au sol (C_{bio}). Certaines molécules contenues dans des fractions ont un effet négatif sur la prédiction du BMP alors qu'elles ont un effet positif sur la prédiction du C_{bio}. Ainsi, la fraction SEOM a un poids plutôt négatif sur le BMP (notamment les zones de fluorescence complexes 4 à 7) alors qu'elles ont un poids plutôt positif sur la prédiction du C_{bio}. Certaines molécules sont biodégradables à la fois dans les conditions du BMP et dans celles de C_{bio} comme les fractions très bioaccessibles SPOM et REOM (zones 1-3, protéines-like) et d'autres le sont significativement dans C_{bio} mais pas dans BMP, comme la fraction PEOM (holocelluloses). Concernant la fraction NEOM (non extractible), cette dernière a un impact significativement négatif sur le C_{bio} alors que cet impact n'est pas significatif pour le BMP. Ainsi, à partir d'une telle étude, on peut déjà voir apparaître des synergies et antagonismes entre utilisation de la MO pour produire du méthane et utilisation de la MO pour répondre aux besoins de fertilités biologique et physique des sols.

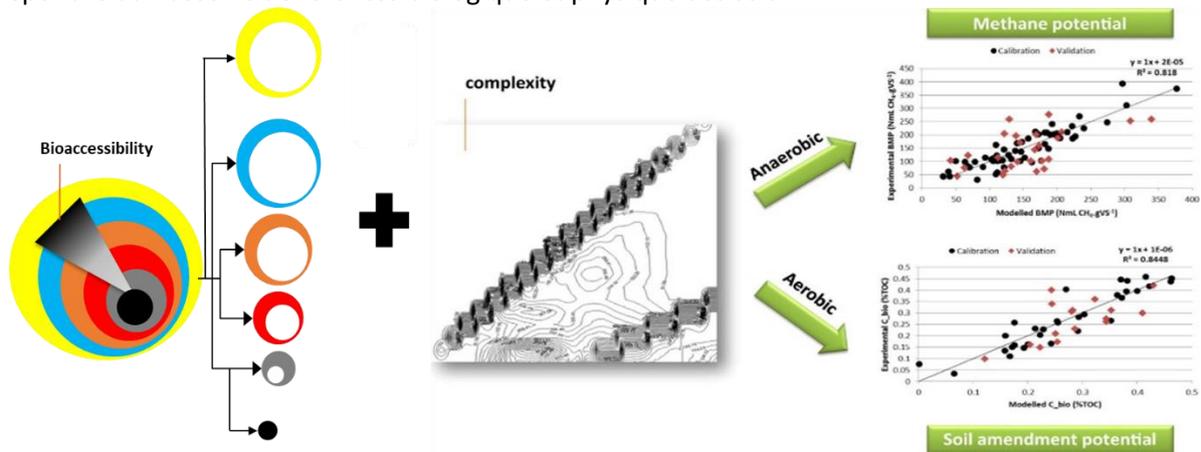


Figure 19 : Graphical abstract adapté sur la prédiction du potentiel méthane et du carbone organique minéralisable au sol à partir de l'IsBaMO® [JJ18]

Plus récemment, cette base de données amendée a été utilisée afin de prédire et comprendre la qualité de la MO des digestats pour l'évaluation de leur stabilité en carbone organique au sol. En effet, à l'aide d'analyses statistiques telles que l'analyse en composantes principales puis la PLS, nous avons mis en évidence dans [JJ04] que (i) la qualité des MO des substrats avait une empreinte statistiquement significative sur la qualité de la MO des digestats associés avec l'identification de quatre groupes de substrats/digestats de même nature, (ii) la prédiction de la qualité de la MO des digestats (bioaccessibilité et fluorescence) à partir de la qualité de la MO des substrats était possible et (iii) l'analyse de ce modèle associé avec le modèle PLS précédemment établi pour prédire la minéralisation du C au sol (C_{bio}) pouvait mettre en lumière certains leviers d'action pour contrôler la qualité de la MO (aspect approfondi dans la section sur l'axe 2).

Concernant l'azote organique, l'étude réalisée avec [JJ15] a montré que l'IsBaMO® était plus à même de représenter le degré de minéralisation de l'azote organique au sein d'un méthaniseur. En appliquant la même démarche que les validations précédentes, un modèle PLS a été réalisé sur une vingtaine de résidus dont l'azote sur les fractions IsBaMO® a été mesuré afin de prédire la biodégradabilité anaérobie de l'azote organique déterminée expérimentalement via des tests similaires aux tests de potentiel méthane. La qualité du modèle est satisfaisante et se voit augmenter en réalisant un modèle par groupe de degré de minéralisation évalué statistiquement comme évoqué précédemment, diminuant significativement les erreurs de prédiction.

Enfin, les variables ayant un poids significatif sur la prédiction de la biodégradabilité de l'azote organique sont notamment l'azote contenue dans la fraction la plus bioaccessible et dans la fraction qui cible les holocelluloses, moins accessible.

La fraction non extractible n'a aucun poids sur cette prédiction étant donné que cette fraction est censée contenir surtout des molécules comme la lignine.

Toutefois, les fractions extractibles de l'azote organique ne contribuent pas de la même manière que celles du carbone organique comme vu dans [JJ18].

Enfin, les expérimentations décrites précédemment concernant le potentiel prédictif d'IsBaMO® pour décrire la disponibilité de l'azote et du phosphore pour les plantes ont permis d'avoir des données de caractérisation sur 10 digestats d'origines différentes utilisées comme fertilisants pour faire pousser du ryegrass. Des données de quantités d'azote et de phosphore assimilées par les plantes (tissus aériens et racinaires) ont permis de réaliser des tests statistiques afin d'évaluer les corrélations entre caractérisation et réponses de la plante.

Concernant l'azote, une corrélation négative significative entre ratio C/N du digestat et prédiction de l'azote contenue dans les tissus aériens de la plante a été obtenue menant à l'établissement d'un modèle de régression linéaire. Ce ratio déjà très fortement corrélé négativement avec le pourcentage de minéralisation de l'azote dans le sol (sans plante) décrit la limitation de l'azote pour l'activité biologique du sol. En effet, si l'azote est limitant, les microorganismes immobilisent l'azote du sol qui devient indisponible pour la croissance des plantes (Cavalli et al., 2017; de la Fuente et al., 2013; Grigatti et al., 2011; Morvan et al., 2006; [JJ07]). De plus, l'azote soluble minéral est également très corrélé avec l'assimilation de l'azote par les racines, notamment les nitrates contenus dans la fraction soluble, résultat observé également par (Gunnarsson et al., 2010). Les autres fractions issues d'IsBaMO® ont moins d'impacts sur ces prédictions. Toutefois, ces dernières participent au classement des digestats établi selon leurs valeurs de C/N et les caractéristiques des fractions azotées de IsBaMO, notamment les fractions les plus bioaccessibles organiques et inorganiques.

Concernant le phosphore, l'utilisation des extractions chimiques séquentielles (Grigatti et al., 2015) permet de trouver une corrélation entre phosphore disponible chimiquement et phosphore assimilé par les plantes. En effet, le phosphore minéral extrait par de l'eau a un impact positif significatif sur la prédiction du phosphore retrouvé dans les tissus aériens alors que la fraction organique du phosphore extrait par NaHCO₃ et NaOH est significativement corrélée avec le phosphore mesuré dans les racines. En effet, le phytate et autres esters de phosphates (phosphore organique) sont extraits dans la fraction NaOH (He et al., 2010). D'après (Gerke, 2015; Lambers et al., 2006), les racines sont susceptibles d'exsuder des phosphatases capables d'hydrolyser le phytate et les formes organiques du phosphore afin de les absorber.

Ainsi, bien qu'utile au classement des digestats, l'ensemble du fractionnement IsBaMO® n'est pas nécessaire à la prédiction de la capacité d'absorption de l'azote par les plantes, seule la part de l'azote minéral contenu dans le soluble et le ratio C/N total suffisent. Quant au phosphore, l'IsBaMO® n'est pas pertinent contrairement au fractionnement de Grigatti et al. (2015). Ce dernier devrait être testé pour décrire le devenir du phosphore dans les procédés afin de pouvoir combiner procédés et qualité des produits retournés au sol.

Fait Marquant 2 : Utilisation de l'IsBaMO® pour décrire le devenir de la MO d'un fumier dans le sol, collaboration avec INRAE SAS

Nous avons vu que l'indicateur IsBaMO® était pertinent pour prédire à la fois la biodégradabilité anaérobie du carbone et de l'azote organique. Ce paragraphe est dédié à la validation expérimentale de l'utilisation de cet indicateur pour décrire les cinétiques de biodégradation du carbone et de l'azote dans le sol. Pour ce faire, une collaboration avec INRAE SAS a permis de suivre la biodégradation de la MO au cours d'une incubation sur sol d'un fumier bovin sur plus d'un an. Ce test avait la particularité innovante d'utiliser un litter bag en nylon (porosité de 200 µm) afin d'isoler la matière à dégrader du sol tout en s'assurant que la biodégradabilité du fumier n'était pas perturbée. Ce dernier point a été confirmé en comparant les courbes de cumul de minéralisation du carbone organique entre modalités avec et sans litter bag où il n'y avait pas de différence significative observée.

Des prélèvements de fumier réalisés à plusieurs temps pendant un an ont permis de réaliser des analyses de carbone, azote et de leur bioaccessibilité via IsBaMO®. La Figure 20 présente l'évolution des deux éléments durant le temps d'incubation ainsi que leur pourcentage total de biodégradabilité. Il apparaît que la biodégradabilité de la MO suit l'accessibilité chimique proposée par IsBaMO® étant donné que plus la MO est accessible, plus elle est biodégradée. Concernant la cinétique de biodégradation, il y a encore une fois un gradient de biodégradation cohérent avec IsBaMO® avec une diminution de la vitesse de biodégradation lorsque la matière devient moins extractible (vitesses de biodégradation : SPOM>REOM>SEOM>PEOM>NEOM).

Enfin, ces cinétiques et le degré de biodégradabilité sont toutefois différents entre le carbone organique et l'azote organique mettant en lumière, comme précédemment vu en méthanisation, qu'il faut considérer les deux éléments de manière indépendante.

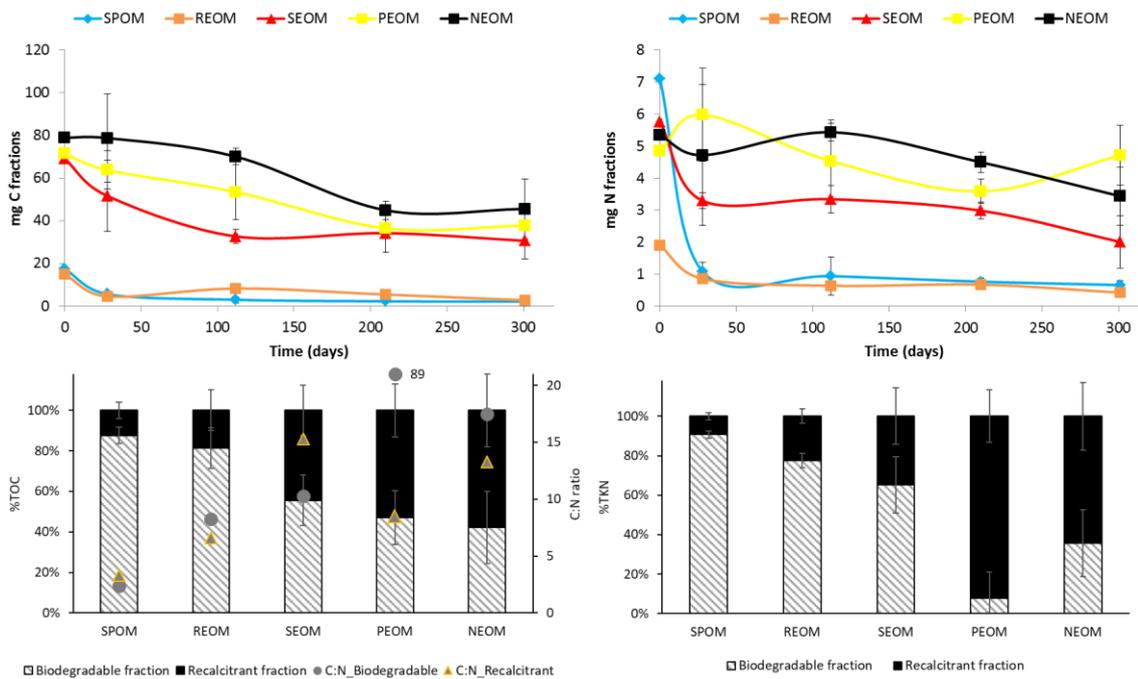


Figure 20 : Evolution du carbone et de l'azote organiques au cours de l'incubation sur sol d'un fumier bovin [JJ32]

2.4. Bilan

L'IsBaMO®, initialement conçu afin de décrire le devenir de la MO pendant la méthanisation des résidus organiques et étendu à son devenir dans le sol, a ensuite été utilisé et associé pour la description d'autres concepts liés à la MO, non développés ici :

- Evaluation des traitements (pré-traitements physico-chimiques) : [JJ16], [JJ06] et [JJ08]
- Devenir des micropolluants [JJ17], [JJ23]
- Survie des pathogènes dans le stockage des digestats [JJ20], [JJ21]

Concernant ces deux derniers volets liés à l'innocuité, j'ai surtout collaboré avec des chercheurs de mon unité (Dominique Patureau pour les micropolluants organiques et Nathalie Wery pour les pathogènes).

J'ai également participé à des études afin d'utiliser la spectroscopie proche infra-rouge pour prédire des variables diverses, que ce soit le potentiel méthane [JJ22] ou encore la qualité agronomique globale des digestats [JJ02]. L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'analyser rapidement un résidu après lyophilisation et broyage de ce dernier. Toutefois, la complexité n'y est pas révélée et la bioaccessibilité manque pour prédire les cinétiques.

Afin de dresser un bilan de mes activités de recherche menées sur l'axe 1 autour de la caractérisation de la matière pour décrire à la fois services rendus, processus biologiques des procédés et variables d'entrées aux modèles associés, leur état d'avancement est présenté dans le Tableau 1.

Jusqu'à présent, ma démarche scientifique a été de baser mon raisonnement à partir des objectifs ciblés pour définir les méthodes de caractérisation. Cela a permis de répondre à plusieurs problématiques liées à cet axe et d'ouvrir de larges perspectives d'utilisation des indicateurs proposés. Toutefois, un des inconvénients de la démarche a été de cloisonner mes activités à des techniques analytiques mises en place (fractionnement IsBaMO® et fluorimétrie 3D) et de ne pas avoir une démarche plus prospective en investiguant d'autres méthodes de caractérisation de la matière susceptibles d'apporter un éclairage nouveau. C'est pourquoi, dans le cadre de la thèse de David Fernandez-Dominguez (2020-2023), une revue de la littérature explorant une gamme de techniques spectrales existantes pour mieux identifier la structure de la MO (y compris la spectroscopie infrarouge moyen, la résonance magnétique nucléaire) a été réalisée afin de mettre en lumière les techniques pertinentes et les autres indicateurs existant pour décrire les mécanismes de biodégradation des MO en digestion anaérobie [JJ01]. De plus, les aspects « structure physique » des résidus n'ont été que faiblement abordés via le fractionnement IsBaMO®. En effet, bien qu'utilisable pour décrire une accessibilité chimique (i.e « couches » de fractions plus ou moins accessibles), un des inconvénients de cette méthode est l'impact de l'utilisation de réactifs chimiques sur la structure de la matière. Est-elle dénaturée lorsqu'elle est analysée dans les extraits par fluorescence ? Quelles conséquences sur la matière restante ?

La MO extraite étant très complexe, l'identification des molécules est également complexe. Or, si l'on veut aller plus loin dans la connaissance des processus biologiques impliqués dans la biodégradation de la matière, cette identification doit également être élucidée et le choix des méthodes analytiques doit être étendu.

En outre, bien que les indicateurs de bioaccessibilité et de complexité de la matière donnent des éléments de réponses concernant le devenir à court/moyen terme du C (C minéralisable au sol), il manque à définir un « cahier des charges » sur les propriétés spécifiques des besoins des agroécosystèmes issus de ces indicateurs pour réaliser une adéquation optimale entre qualités des PRO et les dits besoins. En effet, quelles propriétés biochimiques seraient souhaitables afin de mieux promouvoir la biodiversité ? La stabilité structurale du sol ? Quelle échelle de temps de biodégradation ? Est-ce que la méthanisation seule ou combinée avec d'autres procédés peut répondre à ces besoins ? Si oui, comment ? De plus, une des perspectives directes de ces travaux est

Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche

une analyse fine des antagonismes et synergies entre services rendus en étudiant les données générées issues des indicateurs proposées dans cet axe : quel type de MO profite le plus au potentiel méthanogène ? Au carbone minéralisable ? Au carbone stockable ?

Enfin, sur la base de ces développements de caractérisation et d'indicateurs, j'ai pu établir de nouvelles bases de données sur les caractéristiques des résidus organiques et de leurs produits incluant des métadonnées sur les conditions de procédés afin d'évaluer et de modéliser les impacts du traitement sur la qualité des produits pour la rétro-ingénierie.

Tableau 1 : Bilan des travaux sur la caractérisation

Services rendus	Production énergie	Amendement organique	Activateur biologique	Fertilisant	Etat d'avancement/ connaissance
Concept associé	Bioaccessibilité et Biodégradabilité anaérobie	Bioaccessibilité et Stabilité du PRO	Biocessibilité et Cinétiques biodégradabilité MO sur sol	Accessibilité et disponibilité des nutriments pour les agroécosystèmes	
Carbone	Fractionnement MO : [JJ27], [JJ18], [JJ10] IsBaMO®	Fractionnement MO : [JJ18], [JJ24], IsBaMO®	Fractionnement MO : [JJ24], IsBaMO®	-	
Azote	Fractionnement MO et N : collaboration avec INRAE OPAALE [JJ15]			Fractionnement N : [JJ07], collaboration avec INRAE SAS Rennes [JJ32]	
Phosphore				Fractionnement P : [JJ07]	
K, S					
Identification des besoins des agrosystèmes à partir des indicateurs développés	Analyse de sensibilité poussée à mettre en place sur la base des indicateurs et résultats obtenus.				

3. Axe 2 : Comment les procédés de valorisation des résidus impactent la qualité des produits résiduaux organiques ?

Le second axe de recherche que j'ai proposé concerne l'évaluation des leviers d'action qui impactent le fonctionnement des procédés de valorisation des résidus organiques et donc la qualité finale des PRO. Cet axe est donc basé sur une amélioration de la compréhension des processus biologiques des bioprocédés de traitement et également sur une meilleure connaissance des impacts de post-traitements biologiques ou physico-chimiques impliqués dans une filière de valorisation. Mon expertise en génie des procédés, et plus particulièrement en génie des procédés de l'environnement, a débuté lors de mes études d'ingénieur pour se poursuivre pendant ma thèse et lors de mes expériences professionnelles. J'ai notamment acquis de l'expérience sur les procédés impliqués dans le traitement des eaux usées (urbaines et industrielles) ainsi qu'en méthanisation des boues et des FFOM. En arrivant à INRAE, il a fallu relever le défi d'étendre à la fois le spectre des résidus organiques (urbains, agricoles et agro-industriels) et le spectre des procédés. Dans le cadre d'une filière de méthanisation, cette gamme peut aller de procédés classiques (compostage, séparation de phases, stockage) à des procédés plus innovants existants ou à développer.

3.1. Objectifs et questions de recherche

Si l'on revient à la définition d'ingénierie inverse ou rétro-ingénierie (« *Pratique qui consiste à analyser un produit fini pour connaître la manière dont celui-ci a été conçu ou fabriqué* »), en plus de connaître la composition du produit fini, s'ajoute la notion de connaissance des processus de fabrication. C'est pourquoi, dans ma thématique de recherche, l'ingénierie inverse repose sur un second pilier qui est le génie des procédés.

En reprenant le schéma déjà présenté dans l'axe 1 et en l'adaptant à l'axe 2 (Figure 21), on retrouve les questions de recherche associées au génie des procédés dans le raisonnement de ma thématique de recherche. Afin d'optimiser et concevoir une filière de valorisation, il faut identifier les leviers d'actions sur lesquels jouer afin d'établir des scénarios optimaux.

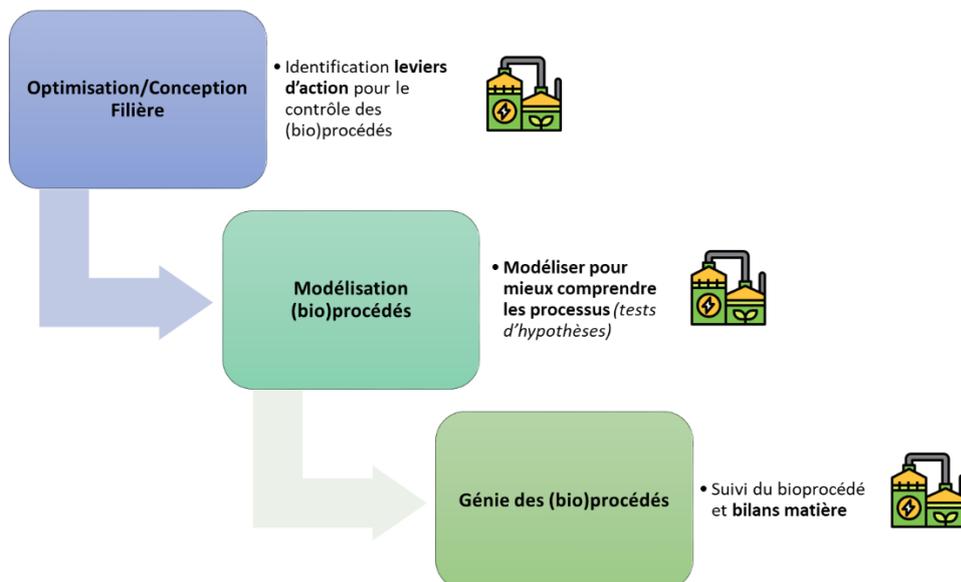


Figure 21 : Questions de recherche associées au Génie Des Procédés au sein de la démarche scientifique de ma thématique de recherche

Dans le cas de la filière de valorisation basée sur la méthanisation, « le challenge du digestat » est au centre de son optimisation. En effet, comme illustré par la Figure 22, la variabilité des intrants croisée avec la variabilité des conditions opératoires et la variabilité des post-traitements entraîne une variabilité de la qualité agronomique des digestats produits.

Dans ma thématique de recherche, je considère ces diverses formes de variabilités comme une opportunité afin de pouvoir contrôler la qualité du produit sortant et ne plus la subir. Toutefois, afin de réaliser cette optimisation, j'ai cherché à répondre aux questions suivantes :

- Est-ce que les différentes formes de variabilité décrites précédemment ont un impact significatif sur la variabilité de la qualité du produit fini ?
- Est-ce que ces impacts sont classifiables ?
- Existe-t'il une hiérarchie en termes d'impacts ?
- Quels sont les mécanismes associés à ces impacts ?
- Est-ce que ces impacts ont un effet sur l'efficacité agronomique des produits ?

Ce paragraphe met en lumière mes recherches effectuées afin de répondre à ces questions.



Figure 22 : Enjeu lié à la variabilité de la qualité des digestats issus de méthanisation

3.2. Evolution matière dans les procédés : variabilité des substrats

A l'aide des outils développés dans l'axe 1, l'étude des procédés tels que la méthanisation, le compostage et d'autres procédés physico-chimiques a été réalisée. Des résultats, que ce soit lors de ma thèse sur les boues d'origine urbaine, lors de mon post-doctorat avec le suivi du continuum méthanisation-compostage ou encore pendant des projets de recherche ont permis de mieux comprendre le devenir de la MO et de proposer des hypothèses quant à son devenir.

Concernant la méthanisation, des suivis de la MO via le fractionnement préliminaire établi lors de ma thèse ont permis de montrer que les boues de STEP étaient biodégradées via plusieurs cinétiques, correspondant à des fractions plus ou moins biodégradables. En effet, un bilan matière effectué sur un réacteur batch montre que la fraction facilement biodégradable est surtout associée aux fractions les plus accessibles, à savoir DOM, SPOM et REOM et que les fractions les moins accessibles participent plutôt à la fraction lentement biodégradable. Cette hypothèse sera confirmée par la suite via une expérimentation dédiée en réacteur continu où la fraction facilement biodégradable des boues de STEP évaluée par identification des cinétiques de production de méthane est associée aux fractions facilement bioaccessibles DOM+SPOM+REOM [JJ27].

Pendant mon post-doctorat puis via les projets de recherches auxquels j'ai pu participé, j'ai récolté des données entrées/sorties de divers méthaniseurs.

Des exemples de bilans matière effectués sur deux types d'intrants contrastés que sont les boues de STEP (riches en protéines) et les fumiers bovins (riches en matière lignocellulosique) sont présentés dans la Figure 23. Comme pendant ma thèse, il apparaît que, globalement, les fractions les plus accessibles sont biodégradées (DOM, SPOM et REOM). Toutefois, les fractions moins accessibles comme SEOM et PEOM ciblant respectivement protéines/substances-humiques/lignocellulose solubles à la soude et holocelluloses n'ont pas la même évolution selon la nature du substrat. En effet, les boues (biologiques) sont plutôt riches en protéines plus ou moins complexes (SEOM) et pauvres en holocelluloses (PEOM) [These_JJ].

En revanche, le fumier bovin voit sa fraction PEOM très riche en holocellulose (fibres biodégradables provenant de la paille composant le fumier) fortement biodégradée alors que la fraction SEOM n'est pas biodégradée.

Ainsi, cette première analyse permet de mettre en évidence que le fractionnement permet de mimer la bioaccessibilité des substrats mais que selon la nature du substrat, les fractions extraites seront plus ou moins biodégradables, d'où l'importance de connaître la qualité de la MO des fractions.

De plus, le temps de séjour de chaque digesteur étudié (25 jours pour les boues et 120 jours pour le fumier) a également un impact sur le degré de biodégradabilité des intrants. En effet, la fraction PEOM, peu accessible, le devient si suffisamment de temps est laissé aux microorganismes afin d'atteindre cette fraction. Ces observations viennent corroborer les expérimentations décrites dans l'axe 1 sur la validation de la bioaccessibilité publiées dans [JJ10].

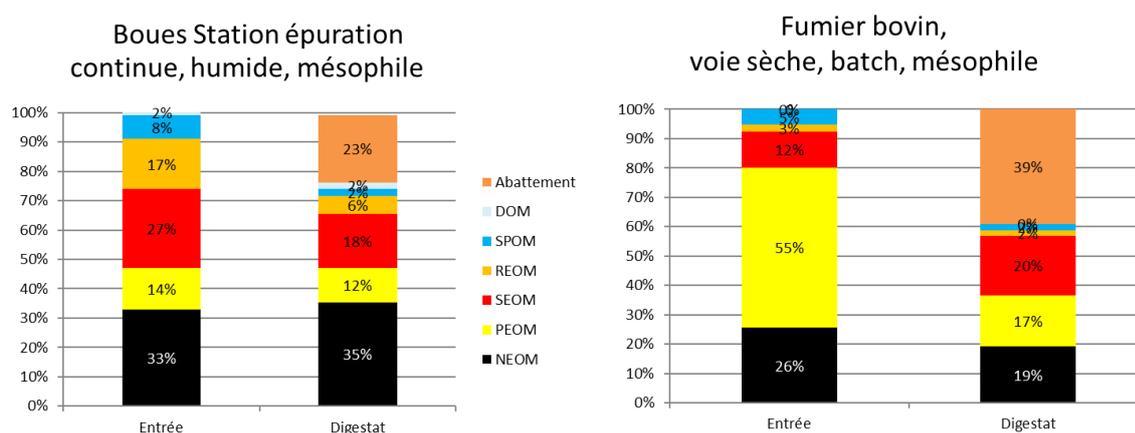


Figure 23 : Bilan matière appliquée au fractionnement IsBaMO aux bornes de deux digesteurs traitant des boues (gauche) et du fumier pailleux (droite)

Ces deux exemples sont assimilables encore une fois à la métaphore de la pêche et noix de coco abordée en début de ce chapitre. Etant donné que la qualité de MO obtenue dans le digestat semble être dépendante de la qualité de l'intrant, on peut supposer que ce dernier peut constituer un levier d'action significatif. Divers travaux ont contribué à illustrer et confirmer cette hypothèse.

Dans le cadre de la thèse de Felipe Guilayn (2016-2019) sous ma co-supervision puis dans le cadre du projet Concept-Dig (2019, ADEME) que j'ai coordonné, une base de données de la qualité agronomique globale³ des digestats de méthanisation provenant de diverses sources a été établie. Pour la première fois, à l'aide d'outils statistiques (analyses en composantes principales ACP, et classification hiérarchique ascendante, HCA), l'impact des intrants sur la qualité agronomique des digestats a été montré via l'établissement de typologies sur les digestats urbains et agricoles [JJ12] et sur les digestats uniquement d'origine agricole (Concept-Dig, ADEME ; [PO7], [PO10]). En effet, la première étude est basée sur un recensement de plus de 150 digestats issus de données internes du LBE, de SUEZ et de la littérature. Les clusters obtenus sont illustrés dans la Figure 24. L'ACP montre que la MS des digestats liés au type de méthanisation (i.e. voie sèche MS >15% et voie liquide MS <15%) et que les teneurs en MO, C/N (fibres), et nutriments impactent la qualité agronomique des digestats et sont directement liés aux types de substrats majoritaires (Boues STEP, Biodéchets, Fumiers, FFOM...).

Le projet Concept-Dig dont l'objectif était de produire un outil d'aide à la conception de post-traitements des digestats en vue de leur utilisation agronomique a permis de réaliser le même travail sur des digestats d'origine agricole. Une enquête menée auprès de 72 agriculteurs méthaniseurs (Association des Agriculteurs Méthaniseurs de France, AAMF) a généré une base de données de qualité globale de digestats qui a été analysée. Les résultats obtenus montrent là encore que les intrants majoritaires et certains co-substrats ont un impact sur la qualité agronomique des digestats. Huit groupes ont été retenus comme l'illustre la Figure 25.

³ Matière Sèche (MS) en g/kg Matière Brute, Matière Organique (MO), Carbone Total (CT), Azote Total (NT), Phosphore Total (P2O5), Potassium (K2O), en g/kg MS, ratios C/N, NH4/NT

Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche

Un résultat remarquable a été de différencier le type de l'animal dont provient le résidu organique (i.e. ruminant ou non ruminant, bovin ou porcin) mettant en lumière que la digestion et l'alimentation de l'animal a un effet sur sa déjection, comme dans le cas de la méthanisation en bioréacteur.

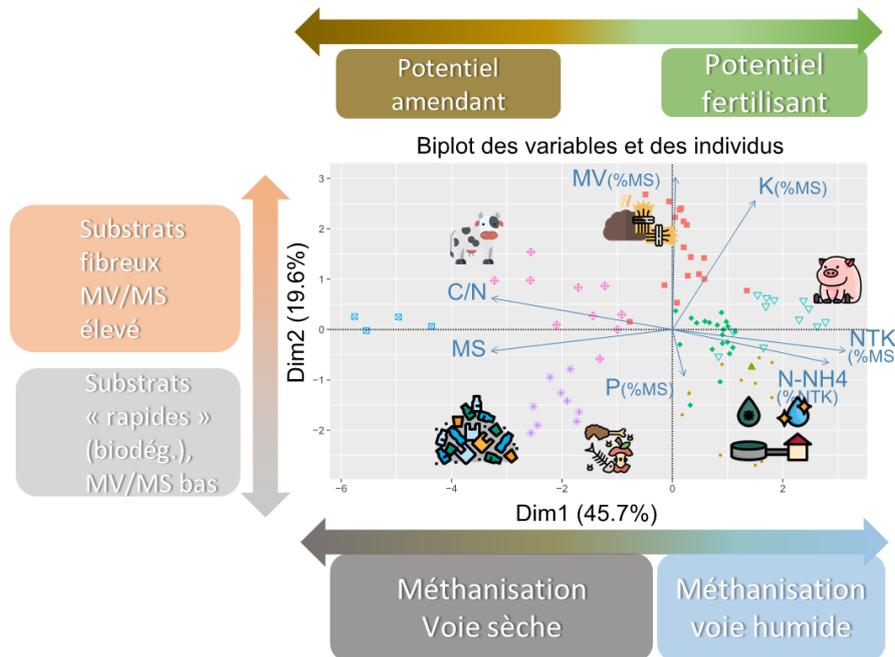


Figure 24 : Etude de la variabilité de la qualité agronomique globale des digestats d'origine urbains et agricoles en fonction des intrants de méthanisation [JJ12]

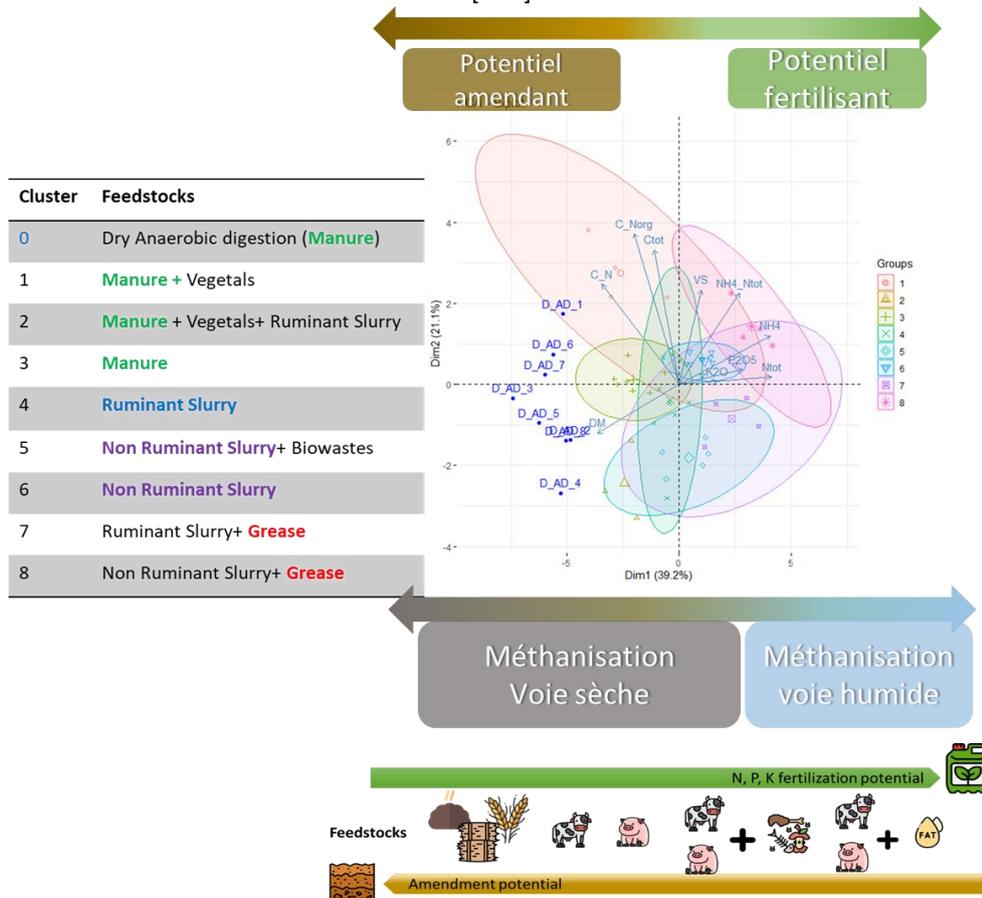


Figure 25 : Etude de la variabilité de la qualité agronomique globale des digestats d'origine agricole en fonction des intrants de méthanisation (Concept-Dig, [PO7], [PO10], [JJ33])

3.3. Evolution matière dans les procédés : variabilité des intrants et mécanismes

Pour aller plus loin et comprendre le devenir de la MO des intrants pendant la méthanisation et leur impact sur la qualité de la MO des digestats, la base de données générée tout au long des projets de recherche depuis 2013 jusqu'en 2021 concernant la caractérisation fine IsBaMO® (axe 1) a permis de confronter la qualité de la MO des intrants à celle de leurs digestats.

Des analyses statistiques ont permis de mettre en évidence plusieurs résultats importants comme reportés dans la publication [JJ04] : (i) sur une trentaine de couples intrants/digestats, une ACP et un clustering montrent que les digestats sont regroupés avec leurs intrants respectifs, soulignant l’empreinte de la qualité de la MO d’un substrat sur la qualité de la MO des digestats, (ii) les groupes déterminés par l’analyse statistique montrent une typologie des couples intrants/digestats par famille de résidus organiques (intrants fibreux fumiers et FFOM), lisiers, boues de STEP et co-digestions diverses), (iii) cette typologie est gouvernée selon les deux axes suivants (déjà définis dans l’axe 1), la complexité et l’accessibilité de la MO et (iv) des grandes tendances d’évolution de la MO et des variabilités significatives permettant d’établir un modèle statistique de prédiction de la qualité de la MO d’un digestat à partir de celle d’un ou plusieurs intrants.

La Figure 26 présente l’ensemble des résultats obtenus dans l’étude publiée [JJ04].

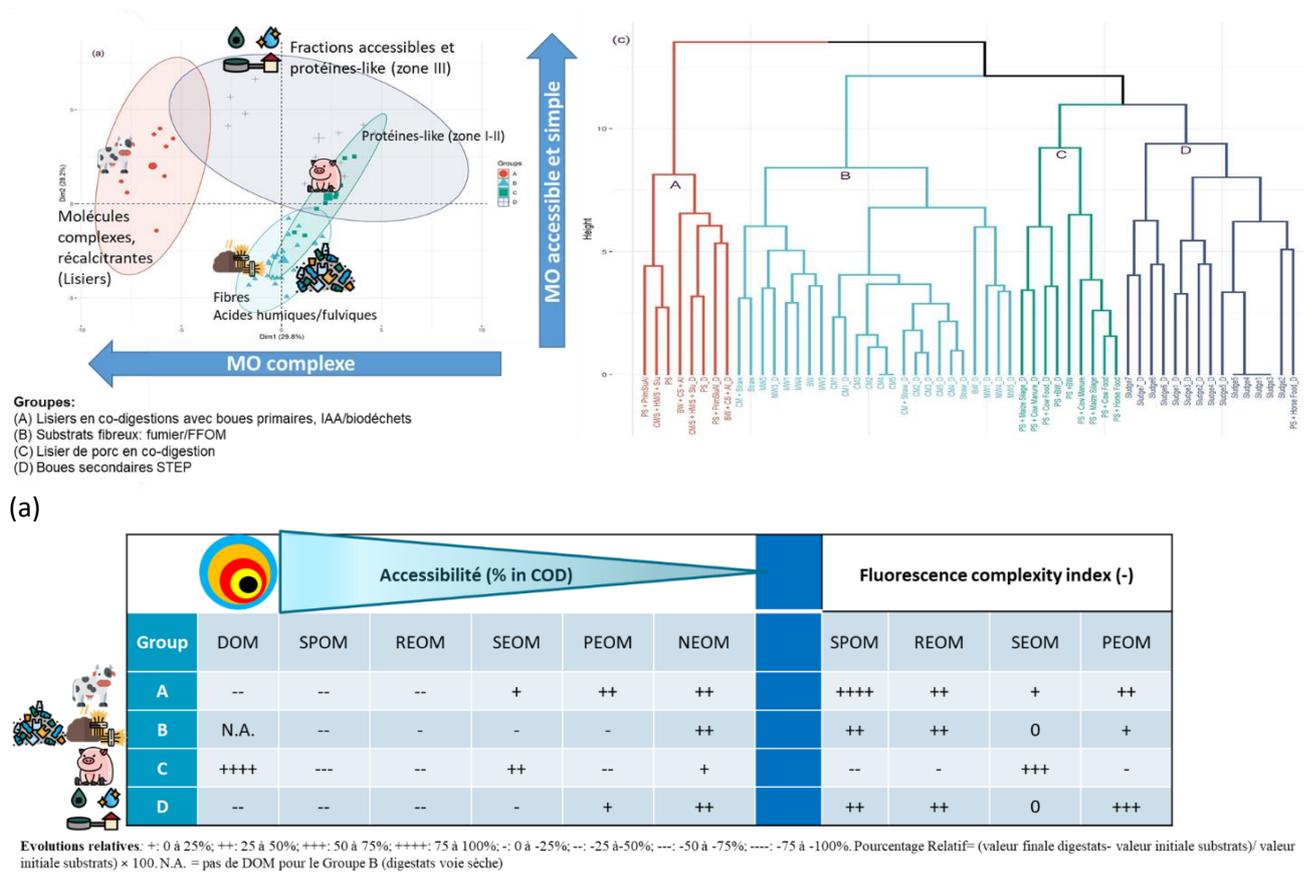


Figure 26 : Etude et prédiction de la variabilité de la MO des digestats en fonction de la qualité de la MO de leurs intrants : analyses statistiques (a) et analyse de l’impact des variables décrivant les intrants sur la qualité des digestats (b) [JJ04] [PO8]

De manière globale, une comparaison relative montre que les fractions particulières accessibles sont biodégradées avec une augmentation de la complexité de ces fractions dans le digestat final et une augmentation de la fraction non extractible (NEOM) relative aux molécules type lignine-like, humines-like et autres composés non identifiés. Toutefois, selon la catégorie d’intrants, les évolutions de certaines fractions peuvent diverger selon la nature des intrants, venant valider les observations décrites par les bilans matières.

Par exemple, les intrants contenant des fractions plus ou moins ligneuses ont une biodégradation différente selon leur contenu (cas des boues STEP versus le fumier ou FFOM), la fraction SEOM augmente en quantité et qualité uniquement dans le cas de la méthanisation des lisiers porcins et fumiers bovins et enfin la fraction soluble DOM est en partie biodégradée mais reste élevée avec une haute complexité comme dans le cas du groupe des lisiers porcins.

Ainsi, le modèle PLS établi à partir des variables explicatives issues de l'IsBaMO® a permis d'étudier l'impact de la qualité de la MO des intrants sur la prédiction de la qualité de la MO des digestats montrant que le levier d'action « intrants » est très significatif. L'empreinte du substrat sur le digestat en termes de complexité et de bioaccessibilité apporte des questions supplémentaires à investiguer comme de potentiels transferts de molécules entre fractions provenant de mécanismes comme l'hydrolyse ou encore une complexification de la MO.

3.4. Impact de la variabilité des intrants sur les agroécosystèmes

L'impact des intrants sur la qualité des digestats a été démontré. Pour aller plus loin dans le raisonnement, un résultat remarquable a été obtenu sur l'impact de co-sustrats sur la qualité agronomique des digestats et leur efficacité au sol. Dans le cadre du projet MAPPED (PIA, ADEME, 2016-2019) et du CDD ingénieur de Bastien Zennaro que j'ai encadré, la caractérisation globale et fine aux bornes de cinq méthaniseurs d'échelle pilote laboratoire a été réalisée afin de caler des modèles de procédés. La particularité de l'alimentation de ces derniers était que l'intrant majoritaire était à chaque fois un lisier porcin (i.e. ration massique > 80%) et que chaque réacteur était alimenté par un co-intrant différent. Les analyses réalisées sur les digestats ont permis ensuite de positionner ces derniers dans la typologie établie dans Concept-Dig (cf. 3.3). Les résultats ont montré que les co-intrants avaient un impact significatif sur la typologie du digestat associé puisque ce dernier était positionné plutôt dans le groupe associé au co-intrant correspondant (fumier, biodéchet, mais ensilé). Seuls les digestats en co-digestion avec la nourriture pour bétail et pour chevaux sont intermédiaires et restent dans le groupe « lisier porcin ». Cela a été aussi confirmé en termes de qualité de la MO des digestats (IsBaMO®) puisque ces échantillons ont été utilisés également dans l'étude de [JJ04].

Puis, en collaboration avec INRAE ECOSYS, des tests agronomiques de minéralisation C et N au sol des cinq produits ont été réalisés. La Figure 27 présente les résultats obtenus concernant l'azote disponible et le potentiel de stockage du C après 91 jours d'incubation. Il apparaît clairement que selon le type de co-substrat, le devenir agronomique du digestat au sol est différent (Figure 27). En effet, l'apport d'un fumier augmente le potentiel de stockage du C dans le sol mais aura un potentiel fertilisant azoté limité contrairement à l'apport d'un biodéchet comme le co-substrat.

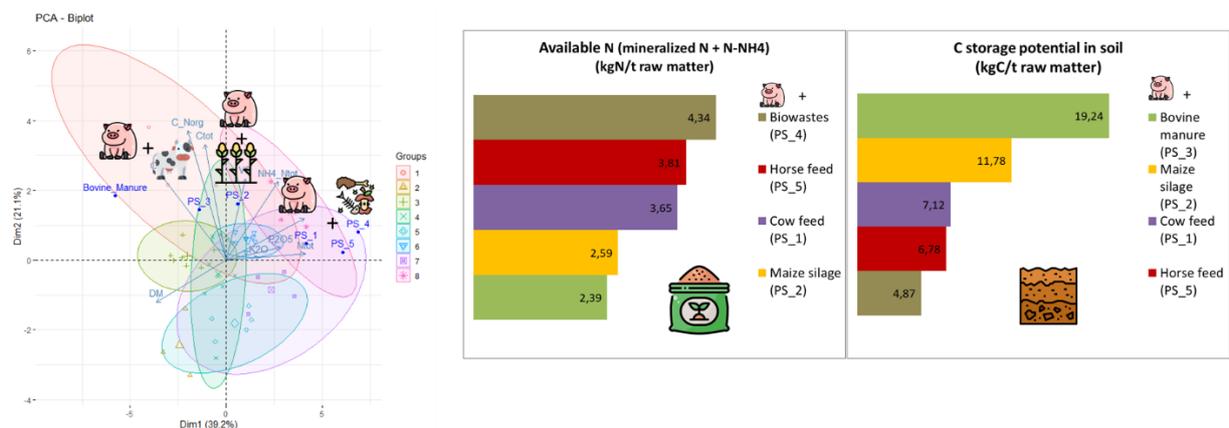


Figure 27 : Validation de la typologie Concept-Dig et impact de la recette entrante sur la qualité agronomique d'un digestat [PO7] [JJ33]

Ainsi, la typologie des digestats associée aux intrants/t raw semble impacter les effets agronomiques de ces derniers lors de leur épandage.

3.5. Impact de la qualité des digestats et conditions opératoires

Le temps de séjour hydraulique, la température, l'humidité (i.e. voie sèche, voie humide) et la configuration du procédé (batch type garage, piston, infiniment mélangé continu) sont les principales conditions opératoires de la méthanisation. Concernant l'humidité directement corrélée avec la MS, nous avons vu précédemment qu'elle jouait un rôle important dans la classification des digestats. Toutefois, la voie sèche ou humide est bien souvent dépendante du type d'intrant traité (voie sèche : fumiers, FFOM versus voie liquide : boues, lisiers, intrants liquides). En effet, dans le projet Concept-Dig, les digestats issus de la voie sèche (et alimentés majoritairement par des fumiers bovins) se retrouvent regroupés ensemble. Ce constat est également valable pour le type de réacteur qui ne montre pas d'impact significatif sur la qualité des digestats (réacteur batch garage corrélé avec la voie sèche et les fumiers, réacteur piston corrélé avec la voie sèche et FFOM puis réacteur continu infiniment mélangé corrélé avec la voie humide).

En outre, nous avons montré dans l'étude de [JJ04] qu'en ajoutant les conditions opératoires (temps de séjour et température) au modèle de prédiction de la qualité de la MO des digestats, les modèles statistiques n'étaient pas améliorés et que le poids de ces variables n'étaient pas statistiquement significatifs. De la même façon, lors des études statistiques réalisées dans la thèse de Felipe Guilayn [JJ12] et dans le projet Concept-Dig [PO7] [JJ33], l'ajout de ces variables à celles de caractérisations des digestats n'a pas permis d'améliorer le pourcentage de variance expliqué.

Toutefois, ces conclusions sont à nuancer. En effet, comme précédemment évoqué, les conditions de températures et de temps de séjour sont très corrélées avec le type d'intrant (par exemple, les boues sont souvent traitées en mésophilie avec des temps de séjour allant de 15 à 30 jours alors que des méthaniseurs traitant du fumier ont des temps de séjour supérieur à 100 jours et ceux traitant les FFOM sont opérés en thermophilie). De plus, dans l'étude [JJ04], le modèle statistique suppose que le temps de séjour est suffisant pour que la MO biodégradable le soit dans le méthaniseur. En effet, une des hypothèses sur l'impact du temps de séjour sur la qualité de la MO des digestats est que plus ce dernier est élevé, plus la MO se stabilise et se complexifie.

Ainsi, afin d'aller plus loin, une décorrélacion entre conditions opératoires et types d'intrant doit être prise en compte via des tests réalisées sous conditions opératoires diversifiées.

3.6. Variabilité de la qualité des produits et impacts des post-traitements

Le second levier d'action identifié dans la filière méthanisation est la variabilité de post-traitements potentiels, plutôt classiques comme la séparation de phases, le compostage de la phase solide, le stockage des diverses phases (brut, liquide, solide) et moins classiques comme des procédés thermo-chimiques ou la pyrolyse.

Au cours de la thèse de Felipe Guilayn [JJ13] et dans le projet Concept-Dig (ADEME, 2019), des études ont été réalisées sur la séparation de phases et l'impact de ce procédé sur la qualité agronomique des digestats. Un premier constat est que la séparation de phases, quel que soit le procédé, permet d'obtenir deux produits, une phase liquide à potentiel fertilisant et une phase solide à potentiel amendant comme illustré par l'ACP réalisée lors du projet Concept-Dig (Figure 28).

Dans l'étude de [JJ13], nous avons étudié le bilan matière du procédé à partir de données internes au LBE, à Suez et de la littérature et sommes arrivés à l'élaboration d'indicateurs d'efficacité permettant de prédire les concentrations en éléments majeurs selon le type de procédé associé à son efficacité de séparation via deux groupes : les procédés à faible efficacité (presse à vis) et les procédés à forte efficacité (centrifugation). La Figure 29 présente les résultats obtenus dans l'étude sur l'élaboration de ces indicateurs ainsi que les répartitions moyennes des concentrations en éléments majeurs dans les phases liquides et solides obtenus dans chacun des groupes. Ces indicateurs et hypothèses ont par la suite été validés en utilisant des bilans matière appliqués à des cas réels sur sites [PO7], [JJ33]. La répartition des éléments est significativement impactée selon le type de séparateur. Dans les deux cas,

la phase solide est plus concentrée en MO qu'en nutriments.

Toutefois, dans le cas d'un séparateur de type presse à vis, la fraction liquide, en moyenne, est proche de la composition du digestat brut initial. Dans le cas d'une centrifugeuse, la séparation est plus performante et la récupération de matière dans la phase solide augmente. Non seulement la MO et l'azote organique augmente mais la distribution du P est différente. Plutôt dans la phase liquide dans le cas d'une presse à vis, le P se retrouve dans la phase solide après une centrifugation.

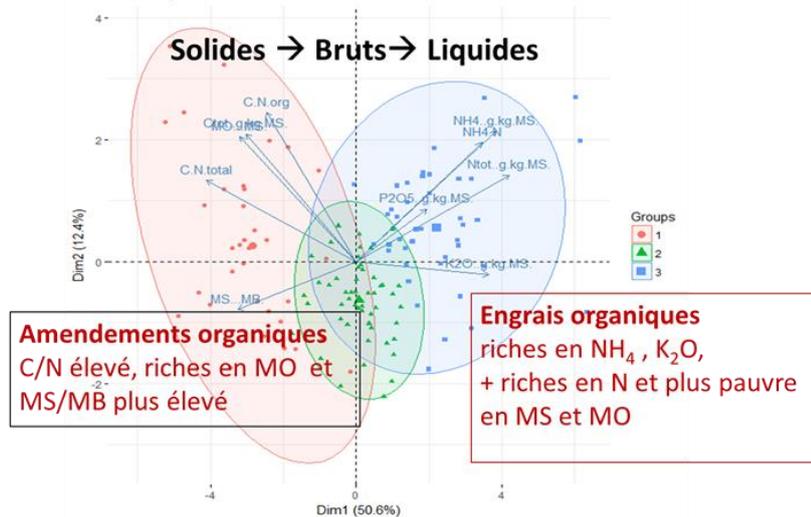


Figure 28 : Analyse ACP sur les digestats bruts, solides, liquides inventoriés dans le projet Concept-Dig [JJ33] [PO7], [PO10], [PO19]

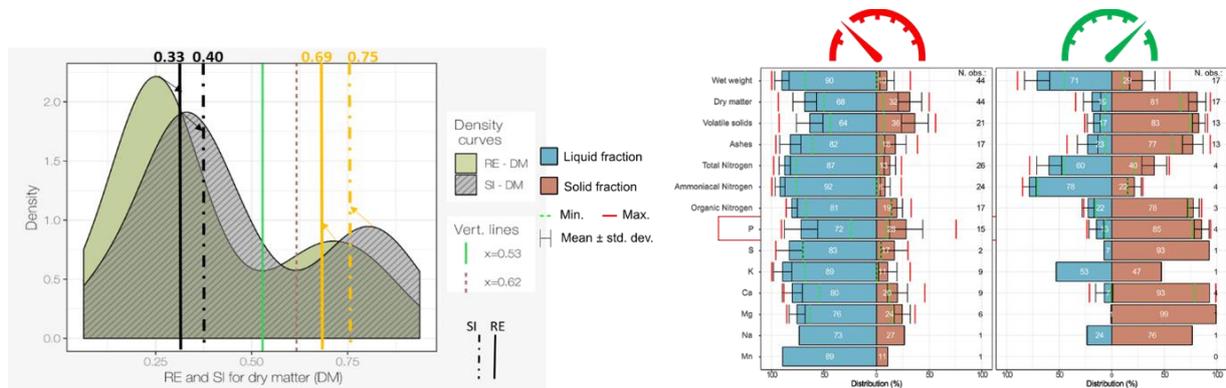


Figure 29 : Distribution des indicateurs d'efficacité de séparation de phases développés dans [JJ13] (gauche) et répartition des éléments selon l'efficacité (faible et élevée) du séparateur de phases [JJ13] (droite)

Des analyses statistiques ont été également réalisées sur les données de qualité agronomique globale des digestats issus de la phase liquide et de la phase solide après séparation de phases.

Il apparaît que l'empreinte des intrants subsiste, avec des clusters de digestats associés aux intrants majoritaires (Figure 30 : Analyses ACP réalisées sur les digestats liquides et solides dans le cadre du projet Concept-Dig [JJ33] [PO7]).

J'ai également étudié d'autres post-traitements tels que le stockage et le compostage des digestats. Concernant le stockage des phases liquides et brutes des digestats, l'évolution de la MO globale est très faible avec des abattements inférieurs à 6% mais l'accessibilité peut être impactée.

L'évolution de l'azote montre des pertes d'azote ammoniacal par volatilisation pouvant aller jusqu'à 80% sans couverture du stockage. Concernant le stockage de la phase solide, ce dernier était proche d'un compostage de cette même phase avec une forte biodégradation de la MO.

Le compostage et le stockage de phases solides augmente l'humification et le potentiel amendant de

Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche

la MO [JJ20] [JJ21].

Remarque : similairement au procédé de méthanisation, des bilans matières aux bornes du co-compostage de boues digérées avec des déchets verts (projet Risq-PRO, ONEMA) ou de compostage de digestats de marcs de raisin (Biogaz-Rio) montrent que les fractions de l'IsBaMO® décrivent avec pertinence l'évolution de la MO pendant le compostage [JJ34].

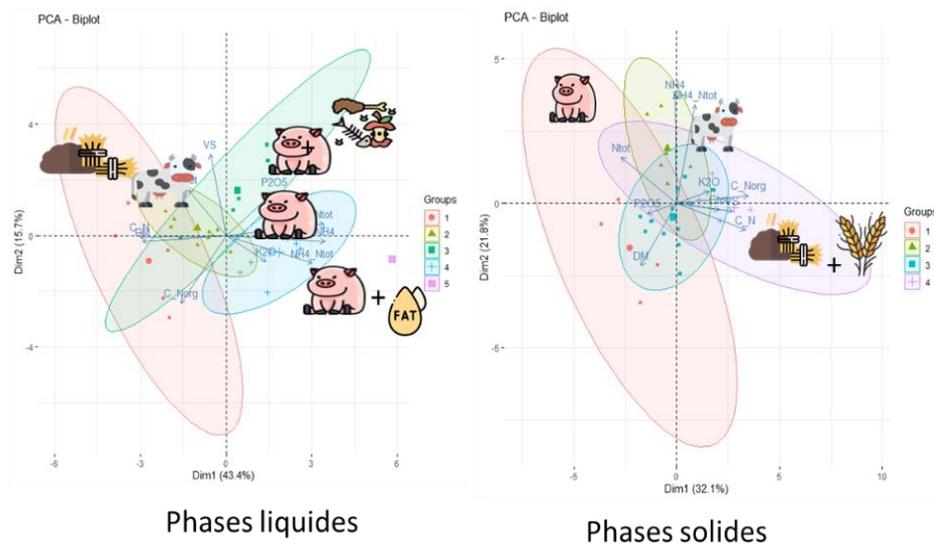


Figure 30 : Analyses ACP réalisées sur les digestats liquides et solides dans le cadre du projet Concept-Dig [JJ33] [PO7]

Dans le cadre de la thèse de Felipe Guilayn, une revue des traitements des digestats a été réalisée [JJ09] et propose plusieurs voies alternatives de valorisation des digestats (Fait Marquant 3). D'autres procédés moins classiques ont été évalués dans le cadre du projet Concept-Dig, non développés ici tels que des procédés thermo-chimiques (ajout de base ou acide à température ambiante à haute, 133°C) ou la pyrolyse.

Fait marquant 3 : Développement de procédés innovants à partir d'hypothèses issues de la caractérisation de la matière

Une autre partie de mes travaux de recherche a été dédiée à utiliser la connaissance de la matière afin de proposer des traitements innovants pour extraire ou concentrer certaines molécules et éléments d'intérêt. Ce fut le cas lors de la thèse de Felipe Guilayn (2016-2019) sur les procédés de valorisation des digestats de méthanisation urbaine. Grâce à une étroite collaboration avec SUEZ et après avoir réalisé un état de l'art sur les traitements des digestats [JJ09], nous avons proposé deux voies de valorisation alternatives à l'épandage direct des digestats d'origine urbaine. En effet, les coûts de transport et la réglementation sont des freins majeurs à leur utilisation en agronomie sans post-traitement hygiénisant ou capable de réduire les volumes des digestats. Dans ce contexte, nous avons investigué d'autres voies de valorisation en étudiant les caractéristiques des digestats. Comme décrit précédemment, les digestats contiennent de la MO complexe comme des substances humiques, entre autres, ayant un potentiel biostimulant et biosurfactant [JJ11].

D'un autre côté, les digestats contiennent une part importante d'azote ammoniacal disponible pour les plantes mais potentiellement volatilisable au pH de ces derniers. L'hygiénisation et la réduction du volume des produits finis font partie également du cahier des charges établi pour une valorisation optimale. Ainsi, les deux voies retenues sont (i) le fractionnement qui consiste en l'extraction de molécules type substances humiques afin de proposer ce produit comme biostimulant et (ii) la conservation consistant en la concentration des éléments. Lors de la thèse, la preuve de concept a été réalisée notamment sur le fractionnement sur plusieurs types de digestats d'origine urbaine : boues, FFOM, biodéchets, territorial et fumier afin d'avoir une référence d'origine agricole.

En effet, inspiré du fractionnement IsBaMO® et de tests similaires sur les composts et autres résidus organiques, nous avons proposé d'extraire les substances humiques avec de la potasse (pH 12). En parallèle, le pH basique favorisant la volatilisation de l'azote ammoniacal, l'idée est de stripper ce dernier et de le récupérer dans un piège acide afin de produire des sels d'ammonium potentiellement utilisables et commercialisables comme engrais. Une caractérisation poussée des substances humiques a été réalisée via des fractionnements sur résines afin de déterminer les acides fulviques, humiques, hydrophobes et hydrophiles ainsi que la caractérisation spectrale en fluorimétrie qui a montré la présence de substances humiques similaires à des références commerciales de biostimulants existant sur le marché. Le potentiel biostimulant a ensuite été testé et validé via des tests en hydroponie [JJ11] toujours en comparaison d'une référence commerciale, ainsi que le potentiel surfactant afin de dépolluer des sols riches en hydrocarbures [JJ11]. Concernant la voie dite de « conservation », des premiers tests ont été réalisés, notamment en termes d'acidification, d'ajout d'additifs ou non et de température de séchage à faible température (70°C) avec toutefois un manque de conclusion sur l'efficacité agronomique du produit final. Il est à noter que la typologie des digestats semble avoir une influence sur les résultats obtenus et l'idée est de proposer une voie plutôt qu'une autre selon le type de digestat et selon certains indicateurs.

Ces premiers résultats encourageants ont permis de proposer une nouvelle étude en collaboration avec SUEZ via le projet Biogaz-Rio (2020-2023). Cette étude a pour objectif de monter en échelle et de réaliser un réacteur pilote afin de tester les deux voies de valorisation et l'efficacité agronomique des produits finis dans les deux cas sur trois types de digestats urbains (FFOM, territorial et biodéchets).

Cet exemple de conception de procédé à partir de la connaissance de la matière pour sa valorisation montre que l'on peut aller vers des services rendus non anticipés au départ et développer des procédés intéressants et innovants.

3.7. Variabilité des produits : hiérarchie des leviers d’actions et perspectives

Un bilan des activités de recherche liées à l’axe 2 est dressé comme le résume le Tableau 2.

Ainsi, à l’aide des différents projets et thèses cités, mes travaux ont permis de mettre en évidence que la variabilité de la qualité des digestats dépend majoritairement de la nature des intrants, des post-traitements appliqués et de certaines conditions des procédés (voie sèche vs voie humide).

Les post-traitements sont un levier d’action significatifs mais nous avons montré que l’empreinte des intrants demeure. Ces variabilités peuvent être utilisées comme leviers d’action afin de produire des produits en adéquation avec les agroécosystèmes, via l’ingénierie inverse. Toutefois, il reste encore à investiguer certains points comme la variabilité des conditions opératoires afin de les décorrélés des intrants.

Ces travaux ont aussi mis en lumière des verrous à lever tels les mécanismes de complexification de la MO pendant le bioprocédé, le devenir des nutriments pendant les procédés, la hiérarchie des leviers d’action et enfin les liens entre typologie des produits établie lors de ces études et typologie des effets sur les agroécosystèmes. En effet, l’hypothèse sous-jacente à l’ensemble de la question de recherche citée ici est que la variabilité de la qualité agronomique des digestats a un impact sur les agroécosystèmes. Même si des premiers éléments de réponses ont pu être donnés via les études de [JJ07] (besoins N et P des plantes et digestats) et du projet MAPPED [PO7] et [JJ33], la question demeure : « la typologie des impacts sur les agroécosystèmes associés à l’épandage des digestats correspond-telle à la typologie des digestats ? ».

A partir des indicateurs, de la connaissance de la matière et son devenir dans les procédés, la modélisation de ces derniers est un moyen de prédire des performances associées à des services rendus, de tester des hypothèses sur les mécanismes du devenir de la matière et de proposer des scénarios afin d’optimiser le design d’une filière de valorisation.

Tableau 2 : Bilan des travaux sur l’Axe 2

Questions de recherche	Principaux résultats	Travaux associés	Supervision thèses, projets, ingénieurs	Etat d’avancement /connaissance
Variabilités des substrats comme levier d’action	Typologie des digestats (qualité agronomique globale et IsBaMO®) Empreinte de la qualité de la MO des substrats sur la MO des digestats Prédiction de la qualité MO des digestats à partir de la qualité MO des substrats	[JJ12] [JJ04] [PO7] [JJ33]	-Thèse CIFRE SUEZ Felipe Guilayn (2016-2019) -Thèse David Fernandez (2020-2023) - Encadrement d’un CDD ingénieur dans le cadre du projet MAPPED (2016-2019) - Coordination du projet Concept-Dig (2016-2019) - Coordination du projet Ferti-Dig (2021-2024)	
Variabilités des conditions opératoires comme levier d’action	Impact de l’humidité sur la classification des digestats Pas d’impacts du temps de séjour, et température sur les variables étudiées	[PO7] [JJ33] [JJ04]	- Coordination du projet Concept-Dig (2016-2019) - Thèse David Fernandez (2020-2023)	

Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche

	<p>Mise en évidence d'une corrélation entre conditions opératoires et types de substrats</p> <p>Besoin de décorreler pour aller plus loin</p>			
<p>Variabilités des post-traitements comme levier d'action</p>	<p>Séparation de phases permet d'obtenir deux produits de qualité agronomique et MO différente (potentiel fertilisant et potentiel amendant)</p> <p>Compostage et stockage permettent la stabilisation de la MO</p> <p>Stockage sur digestats liquides et bruts : effet sur l'azote significatif selon conditions</p> <p>Conception de post-traitements innovants à partir de la connaissance de la matière</p>	<p>[JJ13] [JJ33] [JJ20] [JJ21]</p>	<p>-Thèse CIFRE SUEZ Felipe Guilayn (2016-2019)</p> <p>- Coordination du projet Concept-Dig (2016-2019)</p> <p>- Coordination de l'étude sur la valorisation des digestats dans le projet Biogaz-Rio (2020 – 2022)</p> <p>- Encadrement Assistant ingénieur et ingénieur CDD (Biogaz-Rio)</p>	
<p>Hiéarchie des leviers d'actions</p>	<p>Empreinte des substrats sur la qualité des digestats traités et non traités</p> <p>Effet du traitement semble dépendre de ce dernier et de la typologie du digestat</p> <p>Question encore à investiguer, notamment avec l'ajout de nouvelles études sur les conditions opératoires</p>	<p>[JJ04] [JJ12] [JJ13] [JJ20] [JJ21] [JJ33]</p>	<p>-Thèse CIFRE SUEZ Felipe Guilayn (2016-2019)</p> <p>-Thèse David Fernandez (2020-2023)</p> <p>- Encadrement d'un CDD ingénieur dans le cadre du projet MAPPED (2016-2019)</p> <p>- Coordination du projet Concept-Dig (2016-2019)</p> <p>- Coordination du projet Ferti-Dig (2021-2024)</p> <p>Coordination de l'étude sur la valorisation des digestats dans le projet Biogaz-Rio (2020-2022)</p> <p>- Encadrement Assistant ingénieur et ingénieur CDD (Biogaz-Rio)</p>	

Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche

<p>Mécanismes</p> <p>-MO</p> <p>-Nutriments</p>	<p>Evolution de la MO dans les procédés : bilans matières et pertinences de l'indicateur IsBaMO®</p> <p>Bioaccessibilité, Hydrolyse et mécanismes séquentiel versus simultané (décrit dans Axe 1)</p> <p>Evolution N organique différente du C (décrit dans Axe 1)</p> <p>A investiguer : mécanismes impliquant une complexification de la MO ; autres nutriments (P et S)</p>	<p>[JJ04] [JJ07]</p> <p>[JJ10] [JJ15]</p>	<p>-Thèse David Fernandez (2020-2023)</p> <p>- Collaboration thèse Younès Bareha (2018)</p> <p>- Collaboration thèse Cyrille Charnier (2017)</p>	
<p>Typologie des produits versus</p> <p>Typologie des effets agronomiques</p>	<p>Typologie des digestats impactée par l'ajout de co-substrats induisant des effets agronomiques variables</p> <p>A investiguer : typologie des effets sur les agroécosystèmes en adéquation avec la typologie des produits ?</p>	<p>[JJ04] [JJ33]</p>	<p>-Thèse David Fernandez (2020-2023)</p> <p>- Encadrement d'un CDD ingénieur dans le cadre du projet MAPPED (2016-2019)</p> <p>- Coordination du projet Ferti-Dig (2021-2024)</p>	

4. Axe 3 : Comment réaliser l'ingénierie inverse dans un système de Bioraffinerie Environnementale dédié à la double valorisation énergétique et agronomique sous contrainte environnementale ?

Dans le cadre de ma thématique de recherche, mon ambition est de réaliser une optimisation multi-objectif du système de production d'énergie et d'engrais organiques en fonction des besoins des agroécosystèmes, sous contraintes environnementales via une logique d'ingénierie inverse. Mon idée principale est de proposer des outils mathématiques capables de formaliser le système de bioraffinerie environnementale pour généraliser et produire des scénarios optimaux *in silico*. Ce concept étant complètement nouveau dans ce domaine au début de ma carrière à INRAE, j'ai dû faire face à plusieurs défis concernant la modélisation, la méthodologie d'optimisation multi-objectif et la description des critères d'optimisation. Dans un premier temps et jusqu'à aujourd'hui, j'ai relevé le défi de modéliser la bioraffinerie environnementale et la combinaison des procédés afin de les coupler avec des modèles sol/culture utilisés pour simuler les besoins et contraintes des agroécosystèmes.

4.1. Objectifs et questions de recherche

Comme pour les deux premiers axes de recherche, la Figure 31 présente la place de la modélisation dans ma thématique de recherche. Pour atteindre l'objectif d'optimisation et de conception de filière, la modélisation est un outil puissant capable d'être utilisé pour prédire les performances d'un procédé, sa cinétique et ses limites. La stratégie classique suivie a été d'utiliser des données expérimentales issues des suivis des procédés en tant que données de calage et de validation des modèles. Ces modèles représentant les procédés sont ensuite combinés afin de simuler une filière de valorisation. Enfin, une étude de scénarios basée sur une optimisation multi-objectif selon des critères associés aux services rendus, limitée par des contraintes à définir et se basant sur des leviers d'actions est réalisée.

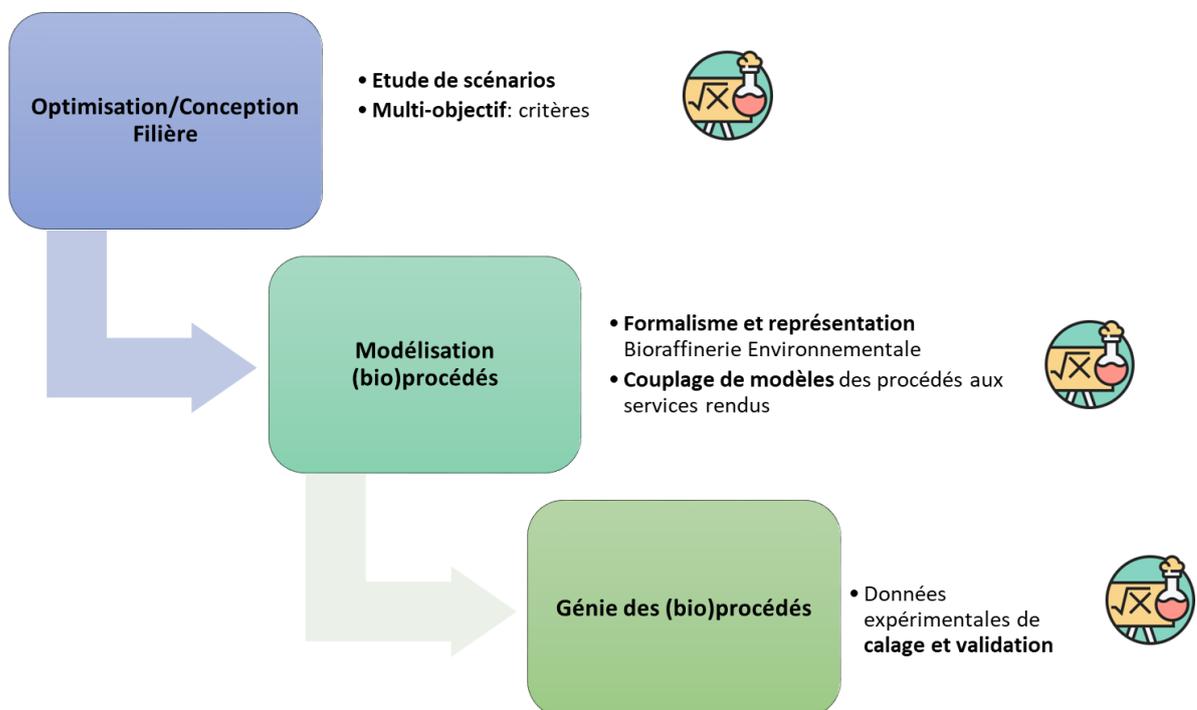


Figure 31 : Place de la modélisation au sein de la démarche scientifique de ma thématique de recherche

En définissant ces objectifs, j'ai identifié des verrous et questions de recherche relatifs à cet axe :

- Les modèles des procédés existants sont-ils suffisamment descriptifs pour prédire les services rendus ciblés ? Si non, comment les améliorer ?

- Les modèles des procédés existants ou développés peuvent-ils être combinés entre eux et avec des modèles agronomiques afin de simuler une filière entière, de l'intrant au retour au sol ? Si non, quelle stratégie mettre en place et quels verrous associés aux couplages ?
- Quel degré de complexité nécessite les modèles de procédés pour répondre aux enjeux de l'optimisation multi-objectif ?
- Quels critères et quelle méthodologie d'optimisation utiliser lors de cet exercice ?

Comme décrit par la Figure 32, à partir d'expérimentations avec des procédés (suivi fonctionnement, expérimentations ciblées dans des conditions opératoires définies, plan d'expériences), des analyses globales fines (i.e. indicateurs de l'axe 1) et des bilans matières réalisés (axe 2), des bases de données contenant à la fois des données analytiques et des métadonnées (i.e. conditions opératoires, données descriptives de l'expérience) ont été établies. L'étape suivante est l'interprétation des résultats via la proposition d'hypothèses explicatives des phénomènes observés et mesurés. Dans cette étape, l'objectif est d'analyser la base de données ou les résultats d'une expérimentation ciblée pour répondre à une question précise afin d'aller jusqu'à la proposition de processus explicatifs et l'identification de leviers d'action sur lesquels s'appuyer pour piloter le procédé. Enfin, l'étape de modélisation est réalisée afin de mettre en équations mathématiques les hypothèses émises à l'étape précédente, de caler ce modèle sur la base de données générées et de le valider grâce à des données externes à celles utilisées en calibration. Si la validation n'aboutit pas, il est nécessaire de revenir aux étapes de calage et de mise en équation, voire à l'étape précédente d'hypothèses et d'interprétation. Il est également possible de concevoir des expérimentations dédiées pour répondre à une hypothèse formulée.

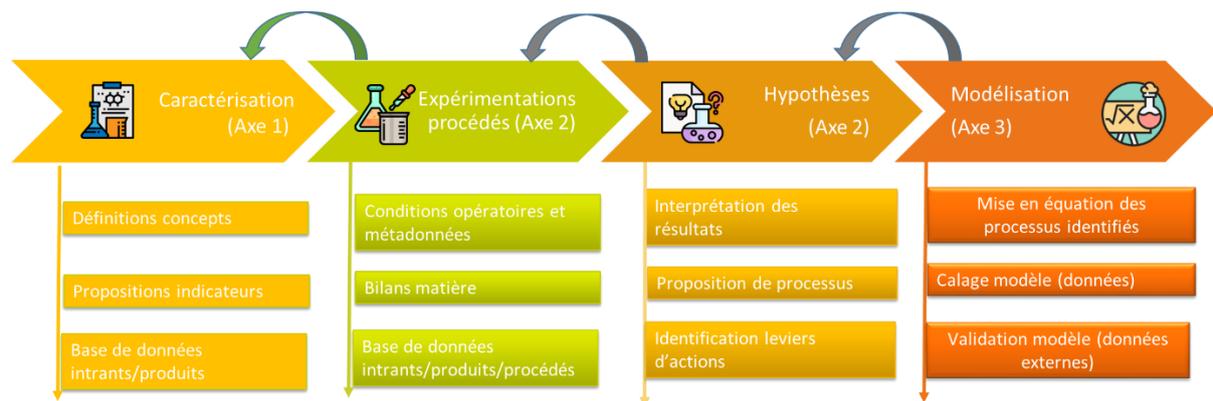


Figure 32 : Démarche scientifique suivie afin de définir un modèle de procédé

Ainsi dans les paragraphes suivants, j'illustrerai des exemples d'études associées à la résolution de certaines questions de recherche posées précédemment : le couplage des modèles pour simuler la filière dans son ensemble et les services rendus associés, le degré de complexité des modèles et les travaux en cours sur l'optimisation multi-objectif.

4.2. Modélisation des procédés : de la complexité des modèles au défi du couplage

Il existe plusieurs types de modèles selon l'objectif fixé de modélisation. En effet, l'objectif de modélisation est de comprendre les processus biologiques afin de tester des hypothèses ou des scénarios précis, les modèles mécanistiques sont plus appropriés, tels que le modèle ADM1 (Bastone et al., 2002) pour la méthanisation. Au contraire, si l'objectif est de prédire une performance ou un service rendu à partir d'éléments intrants connus, sans prendre en compte les processus biologiques impliqués afin de gagner en temps de calcul et en s'affranchissant de la connaissance des paramètres cinétiques, la modélisation dite « boîte noire » basée sur des modèles statistiques est le choix le plus judicieux (exemple des modèles PLS de [JJ18] pour prédire le potentiel méthane et le carbone minéralisable au sol de divers résidus organiques à partir de données de caractérisation).

Dans ce paragraphe, je vais présenter mes travaux de recherche réalisées sur l'utilisation de ces deux types de modélisation afin de simuler une filière de traitement, à savoir des substrats en méthanisation au retour au sol des digestats traités ou non.

Modèles mécanistiques : mieux comprendre les processus biologiques

La modélisation d'une filière de traitements suppose que les modèles de chaque procédé puissent être combinés entre eux. Or, dans la littérature, les modèles de procédés tels que celui pour la digestion anaérobie (ADM1, Batstone et al., 2002) ou encore le compostage (Sole-Mauri et al., 2007 ; Zhang et al., 2012 ; Denès et al., 2015 ; Oudart et al., 2015) ne sont pas combinables étant donné que les variables d'entrées et sorties des modèles sont différentes. De même, les variables utilisées dans les modèles de dégradation de la MO dans les sols (CANTIS, Garnier et al., 2003, STICS résidus, Nicolardot et al., 2001) ne sont pas basées sur les mêmes définitions de variables étant donné que chaque modèle a été réfléchi indépendamment pour des objectifs différents, comme illustrés par la Figure 33.

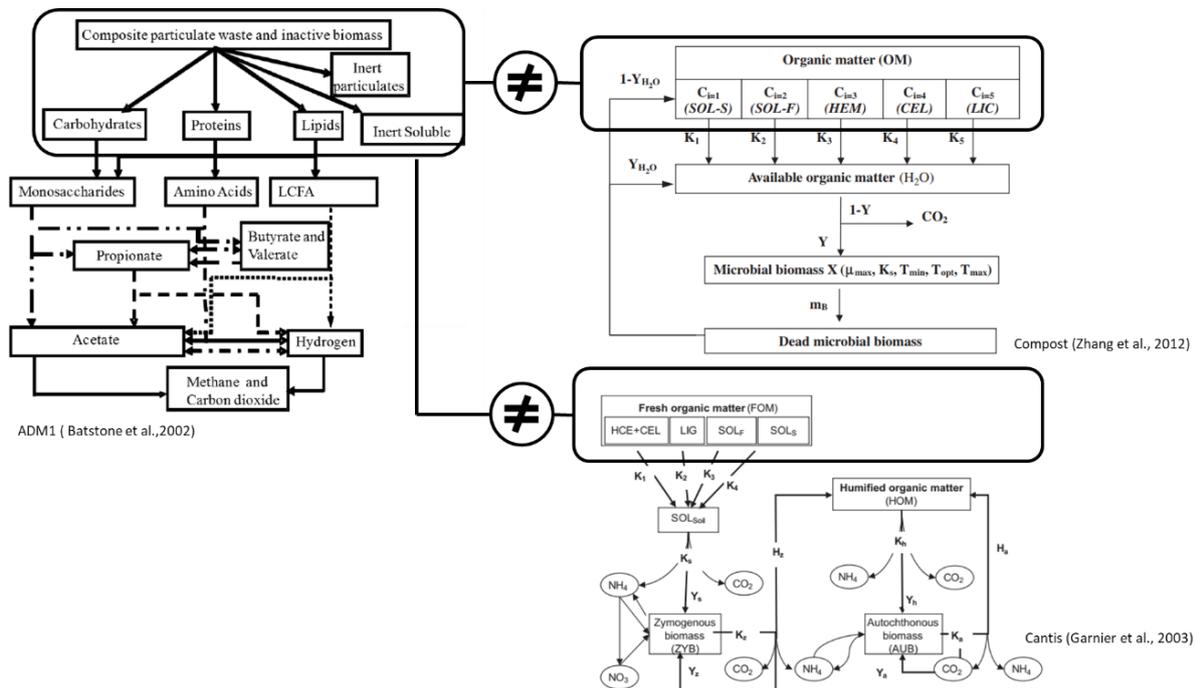


Figure 33 : Illustration de la problématique du couplage des modèles

Cette problématique a été longuement traitée dans le cas de la modélisation d'une STEP (couplage boues activées et méthanisation des boues). Deux réponses ont été apportées : (i) la mise en place d'une interface de transformation des variables, basées sur des hypothèses plus ou moins vérifiées et vérifiables (Jeppsson et al., 2007) et (ii) l'utilisation des mêmes variables tout au long des modèles, quitte à ne pas en utiliser certaines selon les procédés (Grau et al., 2007). Durant mon expérience dans le domaine de la modélisation de station d'épuration, j'ai été confrontée à la première option. Cette dernière suppose des hypothèses non justifiées comme par exemple que les variables représentant la MO non biodégradable restent les mêmes que ce soit dans le procédé boues activées ou dans le procédé de méthanisation. Cette option n'est pas non plus optimale pour coupler méthanisation/compostage et sol étant donné que les processus biologiques impliqués ne sont pas les mêmes et n'impliquent pas les mêmes communautés biologiques (bactéries et archae anaérobies en méthanisation versus bactéries aérobies, actinomycètes, champignons en compostage et sol). De plus, dans les travaux de [JJ18], j'ai montré que la biodégradabilité d'un résidu au cours de la méthanisation n'était pas la même que celle mesurée avec du sol.

Ainsi, j'ai privilégié la seconde option, à savoir l'utilisation de mêmes variables tout au long du continuum procédés-sol.

J'ai donc modifié le modèle mécanistique de digestion anaérobie ADM1 sur les variables d'entrée et ai introduit le concept de bioaccessibilité (en utilisant le fractionnement issu d'IsBaMO®) en challengeant la modélisation classique de l'hydrolyse (Fait Marquant 4 basé sur [JJ10].

Ensuite, en combinant les modèles de compostage de (Oudart et al., 2015) et (Sole-Mauri et al., 2007), j'ai proposé un modèle de compostage en prenant comme variables d'entrées les variables de sortie de l'ADM1. Enfin, j'ai modifié le modèle de sol CANTIS (Garnier et al., 2003) en remplaçant les fractions Van Soest initialement utilisées pour prédire la biodégradation de résidus organiques au sol par les fractions IsBaMO®.

Afin de caler et valider les modèles, j'ai mis en place expérimentalement une filière de valorisation d'un mélange afin d'avoir un substrat ayant différentes fractions IsBaMO® à différentes complexités (boues activées épaissies, terreau et biscotte). Après avoir opéré un méthaniseur à l'échelle laboratoire (5L) à l'aide de la supervision d'un stage (Camilla Carvajal, 2015), une étape de compostage a été réalisée en laboratoire avant incubation sur sol.

Un suivi fin des procédés en termes de MO, fractionnement IsBaMO® et variables d'intérêt pour les modèles (production de biogaz, métabolites intermédiaires, pH, MS, azote et carbone minéralisés par l'incubation sur sol) a permis de caler les modèles. Il est à noter que des perturbations (charge et forme de MO) ont été opérées sur le méthaniseur afin de générer des données de validation pour le modèle ADM1. Les résultats ont montré qu'une bonne connaissance de la MO permet de bien simuler les expérimentations. Les paramètres cinétiques ont été calés par fraction et le devenir des fractions pendant la méthanisation (procédé continu) et le compostage (procédé batch) a été un succès comme le montre la Figure 34. Toutefois, concernant le devenir au sol de ces fractions, la seule variable à caler était la cinétique de production de carbone organique minéralisé, générant un problème d'identifiabilité des paramètres de dégradation des fractions. En effet, un suivi de la MO biodégradée dans le sol manque afin d'aller plus loin sur ce calage. L'étude avec INRAE SAS sur la dégradation en litter bag de fumier bovin (Fait Marquant 2) nous donnera l'idée de réaliser une étude dédiée sur le devenir de la MO des digestats au sol en utilisant ce procédé expérimental intéressant (cf. axe 3). L'ensemble de ce travail a été valorisé via des communications en conférences internationales [PO25], [PO26], [PO31][JJ34].

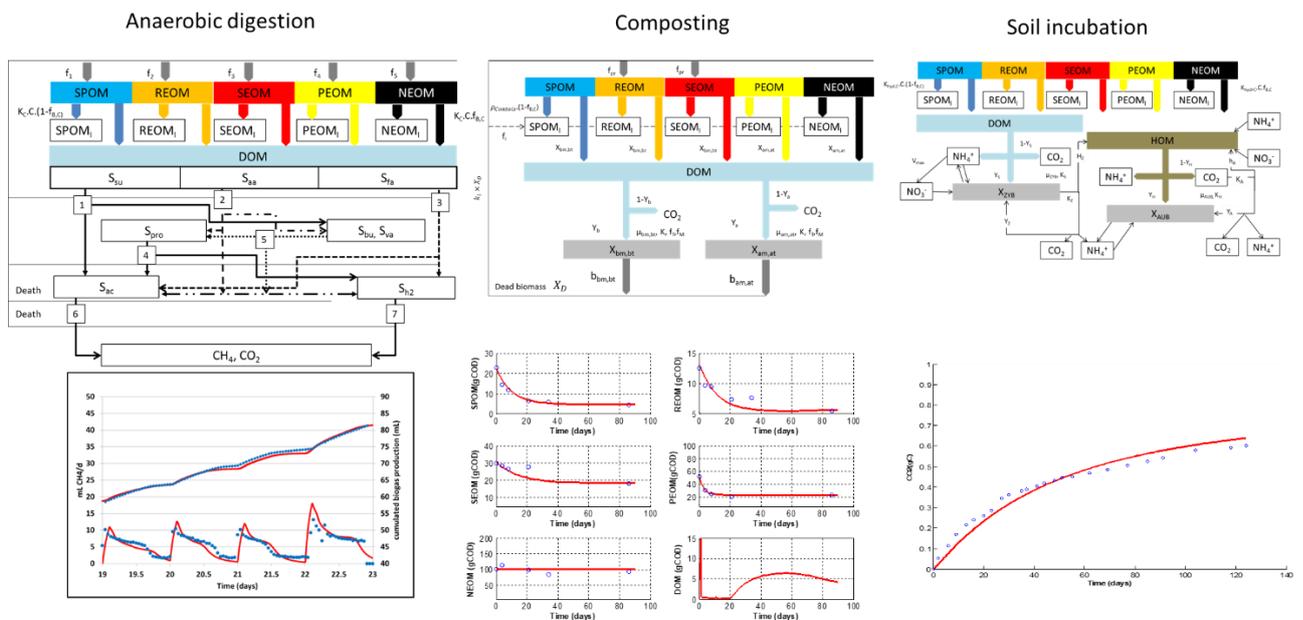


Figure 34 : Résultats obtenus sur la modélisation de la filière de méthanisation des boues [PO25] [PO26] [JJ34]

Concernant les modèles et les besoins des agroécosystèmes, je collabore avec des experts en agronomie à INRAE (ECOSYS, EMMAH, SAS) et à l'étranger (Université de Bologne) pour pouvoir

combiner des modèles de bioraffinerie environnementale avec des modèles d'agroécosystèmes. Cependant, mon expertise en matière de modélisation était principalement axée sur le devenir de la MO et le carbone tout au long de cette filière. La prise en compte des nutriments était nouvelle et, comme pour l'axe 1, il a fallu développer des collaborations impliquant mon travail sur des modèles pour inclure ces éléments. Comme présenté et décrit dans l'axe 1, l'utilisation des fractions IsBaMO® pour décrire le devenir de l'azote organique a été démontrée comme pertinente par l'étude réalisée avec [JJ15]. La modélisation du devenir de l'azote organique et minéral dans la digestion anaérobie a été proposée en collaboration avec OPAALE (INRAE) mais des travaux sont encore nécessaires pour d'autres nutriments, ce qui pose de nouveaux défis pour les recherches futures.

Fait marquant 4 : Modélisation des procédés : challenger la modélisation de l'hydrolyse

Dans l'axe 1, j'ai abordé la validation expérimentale du concept de bioaccessibilité dont le but était d'en apprendre plus sur les mécanismes de l'hydrolyse afin d'améliorer sa modélisation et notamment élucider une question récurrente sur un sujet qui n'a jamais trouvé de consensus : l'hydrolyse des fractions constituant la MO d'un résidu organique est-elle séquentielle ou simultanée ? En effet, l'hydrolyse est l'étape limitante des processus biologiques visant à biodégrader la MO complexe contenue dans la plupart des résidus à valoriser [JJ27]. Dans la littérature, que ce soit pour les procédés anaérobies ou aérobies, il n'y a pas de consensus sur comment la modéliser. Selon les auteurs, certains utilisent plusieurs fractions pour décrire la matière (i.e. facilement et lentement biodégradables, tailles des particules), des cinétiques différentes (premier ordre, Contois) et lorsque plusieurs fractions sont considérées, certains auteurs proposent de décrire l'hydrolyse de la matière comme étant séquentielle et d'autres comme étant simultanée [JJ10]. Ainsi, afin de challenger l'hypothèse commune de l'hydrolyse simultanée, et en se basant sur les hypothèses suivantes (i) la bioaccessibilité gouverne l'hydrolyse et (ii) cette dernière est séquentielle, nous avons construit une série d'expérimentations de biodégradation anaérobie sur plusieurs substrats, comme décrit dans l'axe 1. En se basant sur la bioaccessibilité décrite par le fractionnement issu d'IsBaMO®, nous pouvons décrire chaque concept comme illustré par la Figure 35. Dans le cas du concept simultané, toutes les fractions sont « attaquées » en même temps par les microorganismes alors que dans le cas du concept séquentiel, la fraction la plus bioaccessible est d'abord hydrolysée jusqu'à un certain seuil permettant de libérer et donner accès à la fraction bioaccessible suivante et ainsi de suite. Nous avons modifié le modèle ADM1 et y avons introduit des nouvelles fractions hydrolysables suivant une cinétique de Contois (décrit dans le paragraphe suivant).

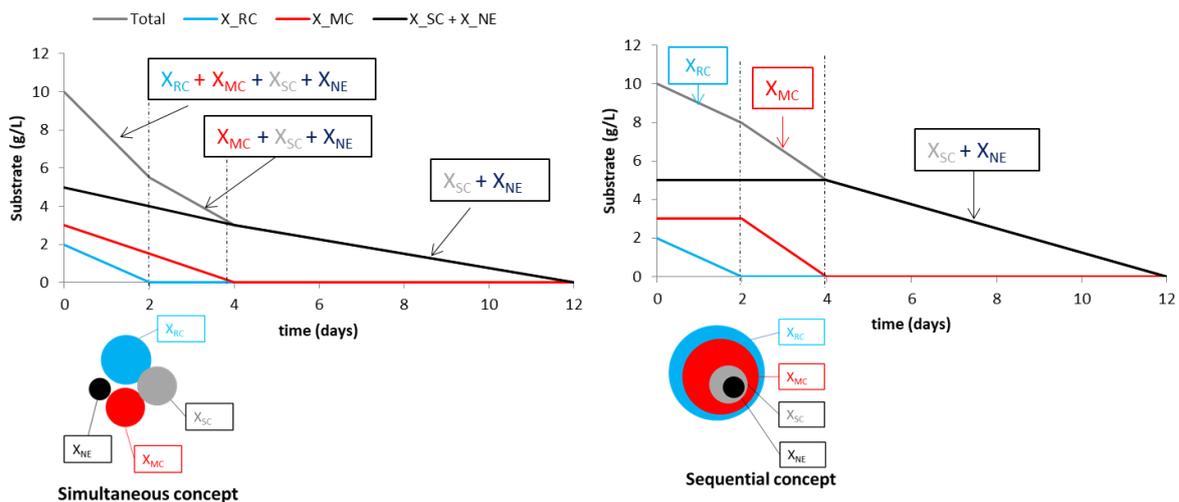


Figure 35 : Définition des concepts de biodégradation simultanée et séquentielle à partir des fractions IsBaMO® [JJ10]

Nous avons ainsi mis à incuber en anaérobiose plusieurs substrats afin de mesurer la cinétique de production de méthane, et pour trois d'entre eux, nous les avons incubés sous leur forme totale puis « déshabillée », à savoir en enlevant progressivement leurs fractions bioaccessibles via le protocole IsBaMO®. Afin de modéliser le concept « séquentiel », nous avons introduit une fonction à une cinétique de Contois décrivant l'hydrolyse de chaque fraction :

$$\rho_i = K_{kyd_S_i} \times \frac{S_i/X_i}{K_{S_i} + S_i/X_i} \times X_i \times F_{accessibility}(S_i), \text{ avec } F_{accessibility}(S_i) = \frac{1}{1 + S_i/K_{I_S_i}}$$

avec $K_{hyd_S_i}$ (j^{-1}) le taux de croissance des bactéries hydrolytiques X_i ($kg\ DCO/m^3$) pour les fractions S_i ($kg\ DCO/m^3$), K_S le taux de demi-saturation des bactéries X_i et $K_{I_S_i}$, la concentration seuil en S_i permettant de passer à la dégradation de la fraction suivante.

Lorsque l'on veut calculer la biodégradation de chaque fraction par différence, il s'avère qu'en se basant sur l'équation dite « simultanée », les cinétiques de biodégradation de certaines fractions des boues et de la paille sont négatives mettant en évidence que la considération du concept simultanée ne convient pas dans ces cas. Les résultats du calage des modèles « simultanés » versus « séquentiel » en utilisant la fonction $F_{accessibility}$ montrent que les erreurs sont significativement plus faibles en utilisant le concept séquentiel. Toutefois si l'on étend ce raisonnement à la considération de co-digestion de plusieurs substrats, la question reste posée : comment se déroule l'hydrolyse ? Y a-t-il à la fois des processus de dégradation séquentielle et simultanée comme avancé par Morgenroth et al. (2002) ? Il est effectivement à noter que la modélisation mécanistique de la co-digestion reste encore un verrou scientifique dans le domaine de la modélisation de la digestion anaérobie.

Ces résultats et réflexions fondamentales ont été discutés, partagés puis co-publiés avec des grands experts en modélisation des procédés de valorisation des résidus dans [JJ10].

Modèles statistiques boîtes noires : prédire la composition de la matière et son devenir au sol

Dans un objectif plutôt opérationnel, les modèles statistiques permettent de prédire des grandeurs d'intérêt en utilisant bien souvent des données facilement disponibles comme des caractéristiques d'intrants. Pour ce qui est de la prédiction à la fois de l'intérêt agronomique et énergétique de la filière de méthanisation, comme décrit dans l'axe 1 puis 2, les indicateurs issus de la méthode de caractérisation IsBaMO® ont permis de générer une base de données sur les résidus organiques afin de prédire les potentiels méthane et carbone minéralisable comme décrit dans [JJ18]. Ces mêmes données ont été également utilisées dans un modèle statistique afin de prédire la qualité de la MO des digestats (indicateurs IsBaMO®) à partir de celle des intrants [JJ04]. Ainsi, à partir de ces deux travaux, le couplage de modèles pour prédire le potentiel méthane, la qualité du digestat et, donc le carbone minéralisable au sol via le modèle C_{bio} peut être établi comme proposé par le schéma de la Figure 36.

Comme explicité dans l'axe 1 puis 2, la combinaison de ces deux travaux permet également de chercher les antagonismes et synergies existants entre les modèles, à partir du poids des variables et l'analyse de leur sensibilité afin d'optimiser le système. Par exemple, pour produire à la fois du méthane et avoir un potentiel stockage C au sol important, avoir un substrat riche en DOM+SPOM avec des zones de fluorescence riches en protéines-like générant un digestat riche en SEOM complexe serait une solution. Il faudrait donc voir dans la liste des intrants et co-intrants du modèle PLS_IsBaMO®, quelle combinaison serait optimale. Cette analyse poussée du modèle intégré de filière fait partie de perspectives à court terme.

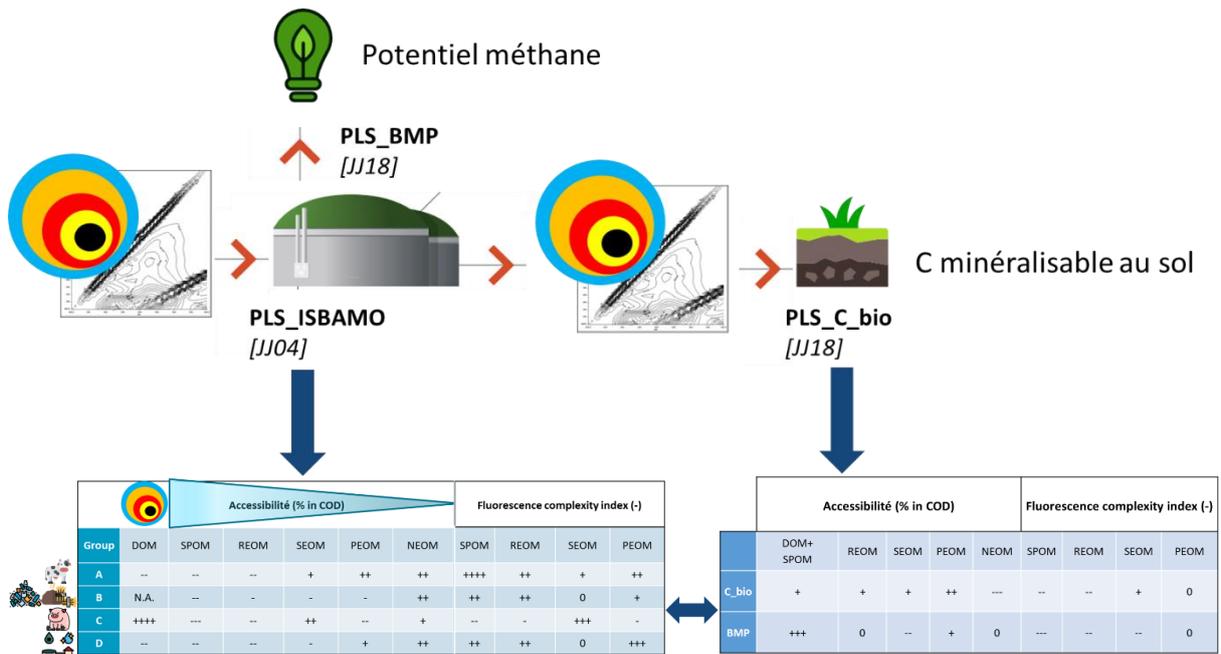


Figure 37 : Schématisation de la modélisation filière de méthanisation à partir des modèles PLS obtenus pour la production de potentiel méthane [JJ18], de la qualité des digestats [JJ04] et du carbone minéralisable au sol [JJ18]

Enfin, dans le cadre du projet Concept-Dig, après avoir mis en évidence l'impact des intrants sur la qualité des digestats, nous avons désiré utiliser les rations massiques des intrants comme variables explicatives d'un modèle PLS de prédiction de la qualité agronomique des digestats. Les intrants ont été répartis en 10 catégories (Fumier, lisier non ruminant, lisier ruminant, ensilages, résidus de cultures, CIVEs, végétaux, biodéchets, déchets gras, autres déchets). Des modèles PLS ont été établis sur un jeu de données de 50 digestats afin de prédire les 10 paramètres définissant leur composition (MS, MO, Ctotal, Ntotal, C/N, C/Norg, P₂O₅, K₂O, NH₄, NH₄/Ntotal). Les résultats sont illustrés par la Figure 38 : Schématisation de la prédiction de la qualité agronomique des digestats obtenu dans le projet Concept-Dig [PO7], [JJ33]. A partir de la composition prédite et à l'aide d'un calcul de distance euclidienne, le type de digestat peut être estimé ainsi que les propriétés agronomiques associées [PO7] [JJ33].

Ainsi, le modèle permet de prédire la composition globale agronomique des digestats, leur typologie et associer un potentiel amendant et fertilisant. Il permet de mettre également en évidence l'impact de l'ajout d'un intrant sur la composition du digestat et son devenir au sol. Ces modèles et calculs font parti de l'outil web Concept-Dig décrit par le Fait Marquant 5.

Toutefois, ces modèles statistiques ont des limites. En plus du nombre limité d'observations, certains types de digestats ne sont pas bien représentés (notamment les digestats issus de nouveaux intrants de plus en plus utilisés en méthanisation, à savoir les digestats de CIVEs ou certains digestats en co-digestion avec des biodéchets et effluents gras). En perspectives, le projet Ferti-Dig que je coordonne avec la chambre d'agriculture de Bretagne va permettre de palier ces manques avec plus de 810 digestats inventoriés dans une base de données dont 459 digestats bruts sur lesquels nous allons pouvoir travailler afin de réaliser une mise à jour des modèles.

Chapitre 2. Présentation des travaux de recherche

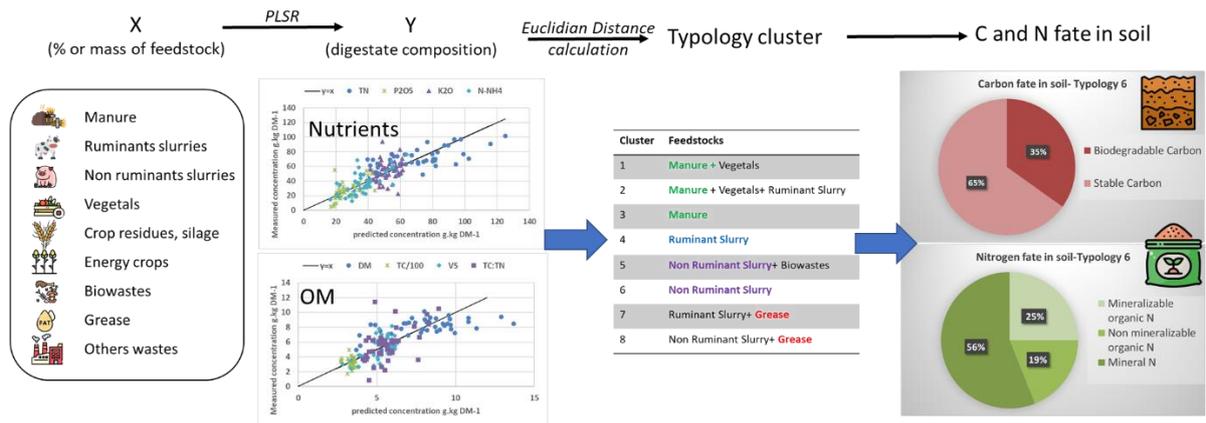


Figure 38 : Schématisation de la prédiction de la qualité agronomique des digestats obtenu dans le projet Concept-Dig [PO7], [JJ33].

Fait marquant 5: Modélisation des procédés pour le développement d'outil d'aide à la décision

L'outil développé dans le cadre du projet Concept-Dig est un autre fait marquant de mes travaux de recherche. Les variables d'entrée étaient la recette type de matière première de la digestion anaérobie pour prédire la valeur agronomique globale (composition en C, N, P, K) des digestats ainsi que leur valeur amendante/potentielle en fonction de leur typologie. Dans cet outil web, des bilans massiques basés sur des indicateurs validés (séparation de phase selon le type de procédé basés sur [JJ13]) et des valeurs d'abattement expérimentales ont permis de prédire la qualité des digestats traités après séparation des phases et stockage/compostage. L'outil a plusieurs entrées : (i) en renseignant la recette en pourcentages massiques des 10 catégories d'intrants possibles, (ii) en renseignant en tonnage la recette des intrants, (iii) en renseignant directement les analyses connues d'un digestat.

Dans les deux premiers cas, des modèles statistiques permettent de prédire 10 paramètres physico-chimiques définissant la composition agronomique globale des digestats (MS, MO, Ctotal, Ntotal, C/N, C/Norg, P₂O₅, K₂O, NH₄, NH₄/Ntotal).

Dans les trois cas, la typologie associée est prédite et donne des caractéristiques agronomiques associée à cette typologie (potentiel amendant, carbone labile et stable, azote disponible, azote organique minéralisable ou peu minéralisable). Ces indications proviennent des données disponibles moyennes inventoriées pour chaque typologie de digestats.

Ensuite, quelle que soit l'entrée choisie, l'utilisateur peut créer des scénarios de traitement des digestats (séparation de phases par presse à vis ou centrifugation, stockage des digestats bruts, liquide et solide).

Cet outil permet de mieux prédire la qualité des digestats en fonction des intrants et des post-traitements afin de proposer une utilisation *ad hoc* dans les sols agricoles. C'est la première fois qu'un tel outil est proposé pour la gestion des digestats et mis à la disposition des propriétaires de digesteurs (agriculteurs) et des instituts techniques.

Ce web tool est disponible sur le site web de la plateforme GRDF sur la méthanisation (<https://projet-methanisation.grdf.fr>) et sera mis à jour via le projet Ferti-Dig en 2023/2024.

4.3. Optimisation multi-objectif d'une filière de méthanisation

L'ingénierie inverse au coeur de ma recherche repose sur une démarche d'optimisation multi-objectifs dont les variables cibles sont les services rendus de la bioraffinerie environnementale, les paramètres à optimiser sont les leviers d'action ayant un impact significatif sur lesdits services rendus et les contraintes sont définies selon les impacts environnementaux déterminés.

Dans le cas de la filière méthanisation, les services rendus sont notamment la production d'énergie, les services agronomiques du digestats (qualité globale et fine du C, N, P, K) selon les besoins sols/plantes, les contraintes sont associées aux impacts environnementaux (limitation volatilisation azote ammoniacal, lixiviation nitrates, émissions gaz à effet de serre) auxquelles on peut ajouter des contraintes réglementaires (seuils en termes de concentrations de certains éléments par exemple),

des contraintes d'innocuité (seuils en micropolluants) et enfin des contraintes territoriales comme le gisement des substrats disponibles.

Les paramètres à optimiser sont les paramètres identifiés comme leviers d'action dans l'axe 2, à savoir le type de substrats et leur qualité, la recette entrante (ration de chaque substrat), les conditions opératoires du procédé de méthanisation et de ses post-traitements.

Toutefois, il s'agit-là d'un objectif ambitieux qui nécessite au préalable de pouvoir modéliser la filière de traitement selon le degré d'optimisation souhaité et des variables à calculer, d'avoir les informations en besoins des agroécosystèmes et de trouver l'algorithme d'optimisation approprié.

En effet, actuellement, la modélisation de la filière n'intègre pas les calculs des impacts environnementaux, et, malgré un premier effort sur le couplage des modèles, elle n'inclut pas l'utilisation des données simulées pendant les procédés pour calculer le devenir des éléments à la fois au sol et dans la plante.

Afin d'apporter des réponses à ces problématiques, je co-dirige la thèse de Margaud Pereme (2020-2023) sur l'optimisation multi-objectif pour l'éco-conception d'une filière de valorisation des résidus organiques via la méthanisation. Les questions de recherche associées sont : comment coupler des modèles pour une représentation globale de la filière de méthanisation, des procédés au sol/plante en considérant les impacts environnementaux ? Comment trouver un compromis entre les objectifs parfois contradictoires de la filière méthanisation via l'utilisation d'un algorithme d'optimisation multi-objectif ?

Concernant la première question, la méthodologie utilisée pour le couplage des modèles a consisté à sélectionner et développer des modèles capables de représenter les variables d'intérêt, de réaliser le dit couplage et de coupler le modèle mécanistique de filière à une analyse de cycle de vie pour simuler les impacts environnementaux. Comme explicité en introduction de l'axe 3, la stratégie retenue afin de réaliser le couplage de modèles mécanistiques est d'utiliser les mêmes variables d'état tout au long de la filière. Etant donné les recherches et résultats obtenus, nous avons opté pour le modèle basé sur ADM1 et modifié en considérant les fractions IsBaMO[®] comme variables d'état, comme expliqué dans le paragraphe précédent [JJ34] en intégrant le devenir de l'azote organique (Bareha et al., 2018). Les post-traitements (séparation de phase et stockage) ont été basés sur des bilans matière comme décrit dans [JJ13] et (Bareha et al., 2021).

Toutefois, les modèles de sol et cultures de la littérature ne correspondaient pas à l'objectif de modélisation de la filière. L'objectif de ce modèle n'est pas de « challenger » les modèles existants de sol (CANTIS, STICS, etc...) mais de pouvoir utiliser les variables décrivant les sorties du modèle de méthanisation afin d'évaluer les services rendus agronomiques associés via le devenir du digestat après épandage au sol et son adéquation avec les besoins d'une culture (N). Ainsi un modèle de sol/culture a été développé afin de décrire la biodégradation de la MO (C et N) des fractions IsBaMO[®] (Figure 39). Ce modèle a ensuite été associé à des modules de calcul pour la volatilisation du NH₃, la lixiviation des nitrates, la prise en compte de l'humidité relative du sol en fonction du climat et enfin la croissance de la plante (AquaCrop, FAO).

Dans le cadre de ce travail, une expérimentation en incubation sur sol de deux digestats de caractéristiques différentes (i.e. C/N et nature d'intrant) a été mise en place et suivie en mode litter bag pour suivre la biodégradation de la MO des digestats. Les résultats ont permis de rédiger une publication en cours de relecture [JJ35] et de montrer que le fractionnement de la MO et de l'azote est capable de décrire les cinétiques de biodégradation des digestats dans le sol mais que la connaissance préalable de la complexité et du taux de biodégradation de chaque fraction dans le sol est nécessaire à l'utilisation du modèle.

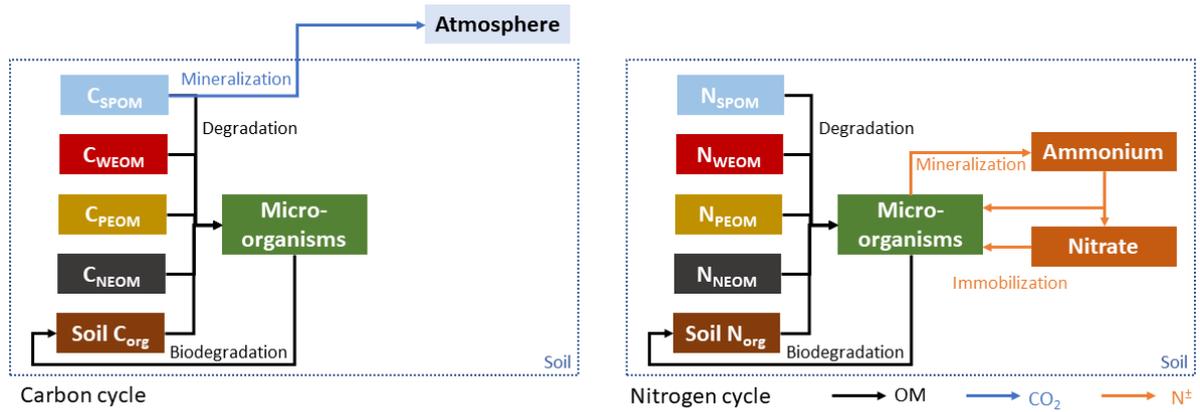


Figure 39 : Modèle de biodégradation de la MO exogène provenant des digestats dans le sol développé dans le cadre de la thèse de Margaud Pereme [JJ35]

Ainsi, une plateforme de simulation de la filière comprenant tous les procédés unitaires jusqu'au compartiment sol et plante a été codée sous Python (Figure 40). La prochaine étape consiste en l'ajout et la combinaison des simulations générées par la plateforme avec les calculs d'impact environnementaux comme réalisés dans les Analyses de Cycle de Vie (ACV). Cette étape cruciale permettra également d'avoir une idée plus précise de la sensibilité des dynamiques et leviers d'actions identifiés « procédés » sur l'analyse environnementale et d'identifier les variables d'état manquantes à modéliser.

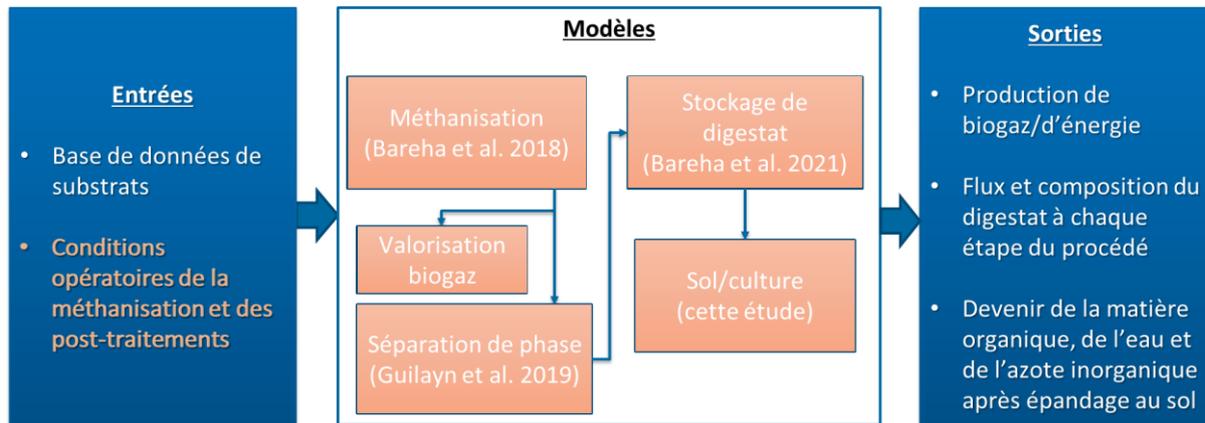


Figure 40 : Plateforme de modélisation de la filière de méthanisation développée sous Python dans le cadre de la thèse de Margaud Pereme [PO9]

Enfin, la dernière étape de ce travail ambitieux sera d'appliquer un algorithme d'optimisation multi-objectifs afin de générer divers scénarios optimaux de cas de filières de méthanisation et d'identifier les leviers d'actions les plus impactants.

4.4. Bilan

Comme pour les axes 1 et 2, le Tableau 3 présente l'état d'avancement des questions de recherche et des travaux associés. Il apparaît que l'état d'avancement est moindre que les axes 1 et 2 étant donné que ces deux derniers alimentent l'axe 3.

Tableau 3 : Bilan des travaux sur la modélisation et l'optimisation de la filière

Questions de recherche	Principaux résultats	Travaux associés	Supervision thèses, projets, ingénieurs	Etat d'avancement/ connaissance
Modélisation et simulation des services rendus	<p>Modèle mécanistique de la méthanisation mis à jour sur la MO</p> <p>Modèle mécanistique proposé pour le compostage</p> <p>Modèles statistiques pour prédire le potentiel méthane, la qualité du digestat et in fine le devenir du carbone au sol</p> <p>Modèle statistique pour prédire la qualité globale agronomique et la typologie associée (propriétés moyennes en C et N de la typologie) à partir de la ration entrante</p> <p>Modèles bilans matières pour la séparation de phases et le stockage (Axe 2)</p>	<p>[PO31], [JJ10]</p> <p>[PO25], [PO26], [JJ34]</p> <p>[JJ04] [JJ18]</p> <p>Outil web Concept-Dig</p> <p>[JJ13], [PO7], [JJ33]</p>	<p>-Thèse CIFRE SUEZ Felipe Guilayn (2016-2019)</p> <p>-Thèse David Fernandez (2020-2023)</p> <p>- Coordination du projet Concept-Dig</p> <p>- Coordination du projet Ferti-Dig</p>	
Couplage des modèles	<p>Couplage modèles mécanistiques méthanisation, compostage et Cantis (MO, C)</p> <p>Couplage modèles statistiques (PLS)</p> <p>Couplage modèles mécanistiques et ACV (en cours)</p>	<p>[PO25], [PO26]</p> <p>[JJ04]</p> <p>[PO4]</p>	<p>- Projet Risq-Pro (post-doctorat Julie Jimenez puis Quentin Aemig)</p> <p>- Coordination du projet Concept-Dig</p> <p>- Thèse David Fernandez (2020-2023)</p> <p>- Thèse Margaud Pereme (2020-2023)</p>	
Complexité des modèles et objectifs	Utilisation de différents types de modèles (mécanistiques et statistiques) pour décrire une filière de méthanisation selon les objectifs	<p>[JJ10], [JJ34]</p> <p>[JJ18]</p> <p>[JJ04]</p> <p>[PO7], [JJ33]</p> <p>Outil web Concept-Dig en ligne</p>	<p>- Thèse David Fernandez (2020-2023)</p> <p>- Coordination du projet Concept-Dig</p>	
Optimisation multi-objectifs	Travaux en cours sur l'utilisation d'algorithmes d'optimisation (algorithmes génétiques)	[PO4]	Thèse Margaud Pereme (2020-2023)	

La modélisation de la filière méthanisation couplant modèles de procédés et devenir de la matière au sol a été réalisée avec succès, que ce soit en considérant des modèles statistiques ou mécanistiques. Dans les deux cas, la stratégie d'utilisation des mêmes variables d'état a été utilisée et permet non

seulement de suivre le devenir des éléments au fil des procédés jusqu'au système sol/culture mais également d'identifier des variables d'intérêt, source d'antagonismes ou de synergies pour la prédiction des services rendus.

Toutefois, dans les deux méthodes de modélisation, orientées selon l'objectif de recherche poursuivi, des données sont nécessaires. Dans le cas des modèles statistiques, ces derniers sont gourmands en données d'apprentissage et les limites en termes de précision de prédiction (extrapolation) et de robustesse en sont impactées. Dans le cas des modèles mécanistiques, l'utilisation du fractionnement IsBaMO® dans le modèle de méthanisation requiert de réaliser cette caractérisation et d'associer la biodégradabilité de chaque fraction C et N aux indicateurs de fluorescence 3D. De même, bien que la plateforme de modélisation filière génère le fractionnement IsBaMO® C et N des digestats, la connaissance de la biodégradabilité de chaque fraction n'est pas prédite alors qu'elle est nécessaire pour décrire la biodégradation des digestats dans le modèle de sol/culture. Ce type de données serait intéressant à compiler afin de proposer des valeurs de référence dans la plateforme de modélisation.

Pour aller plus loin, en termes de verrous encore non élucidés, la modélisation de la co-digestion dans tous les modèles évoqués (sauf dans le cas de l'outil Concept-Dig) n'est pas prise en compte. En effet, un seul substrat est considéré dans les modèles mécanistiques et PLS utilisant IsBaMO® comme variables d'état et explicatives respectivement. Actuellement, la prise en compte de la co-digestion réside dans une somme pondérée des caractéristiques des intrants selon le pourcentage de ration massique de ces derniers et notamment de leur biodégradabilité, sans tenir compte de possibles synergies ou interactions entre substrats comme reporté dans la littérature où il n'y a pas de consensus sur le sujet.

De plus, le manque de simulation des impacts environnementaux dans les modèles de filière développés peut être comblée par un couplage avec de l'analyse de cycle de vie (ACV). Cet exercice pourra nous aiguiller sur les variables sensibles à modéliser et les variables manquantes à considérer.

Enfin, l'optimisation multi-objectif issue de la thèse de Margaud Pereme affinera les perspectives de recherche au niveau des leviers d'actions et du niveau de connaissance en terme de biodégradation de la matière à aller chercher et donc à modéliser, cohérent avec les impacts environnementaux et le devenir du C et N des digestats dans le sol.

Chapitre 3. Perspectives de recherche

S'appuyant sur les régulations naturelles, la conception de (Altieri, 2002) sur l'agroécologie repose sur deux piliers fondamentaux : l'amélioration de la qualité du sol et de son activité biologique, au moyen d'apports importants de MO, et le renforcement de la biodiversité végétale de surface afin d'améliorer les habitats qui abritent des biotes bénéfiques. Ces deux piliers assurent la santé des cultures et de l'ensemble de l'agroécosystème. (Jeuffroy, 2022) précise que baser la construction des modes de production sur l'agroécologie nécessite de (i) diminuer les impacts environnementaux en réduisant voire éliminant les intrants chimiques, (ii) renforcer la santé des agroécosystèmes (contrôle naturel des bioagresseurs), (iii) favoriser l'agrobiodiversité et les synergies entre les composantes de l'agroécosystème, (iv) améliorer la conservation et régénération des sols, de la ressource en eau et de la biodiversité et (v) optimiser le métabolisme des agroécosystèmes en organisant le recyclage des nutriments. Il est aisément identifiable que la méthanisation peut constituer, en théorie, un des leviers d'action significatifs et contribuer à la transition agroécologique. En effet, ce procédé, s'il est maîtrisé et optimisé, peut permettre de recycler des résidus organiques, de transformer les matières en produits pouvant répondre aux besoins des agroécosystèmes tout en générant une production de gaz vert participant à répondre à l'enjeu du changement climatique, et, *in fine*, de boucler les cycles géochimiques dans un souci de bioéconomie circulaire. La variabilité des résidus organiques et des traitements, croisés à la variabilité des agroécosystèmes, est une opportunité qui confère à l'outil « méthanisation » un potentiel de flexibilité et d'adaptabilité à l'évolution des pratiques et à la diversité de situations territoriales. Théoriquement, cette adéquation entre agroécologie et valorisation des résidus organiques via la méthanisation a un très fort potentiel. Toutefois, ce potentiel peut être atteint à conditions de maîtriser les impacts et effets de cette pratique sur les agroécosystèmes et l'environnement. Cette optimisation passe nécessairement par la gestion de compromis entre agroécologie et production d'énergie pouvant générer des antagonismes entre ces services rendus. Comme le souligne (Jeuffroy, 2022), l'agroécologie doit être raisonnée via une vision systémique en prenant en compte diverses disciplines afin d'être optimisée. Tout au long de mon mémoire, j'ai voulu répondre à diverses questions de recherches liées à cette problématique en me focalisant sur la filière méthanisation. J'ai proposé un changement de paradigme en promouvant une conception optimale de filière en réalisant de l'ingénierie inverse, c'est-à-dire en partant des besoins des agroécosystèmes et des services rendus par la filière de valorisation. A partir de cette ligne directrice, j'ai décliné ma problématique de recherche en trois axes : (i) caractérisation via le développement d'indicateurs, (ii) procédés et identification des leviers d'actions et enfin (iii) modélisation et optimisation. Suite au bilan décrit dans le Chapitre 2, des travaux ont amendé chaque partie mais des verrous de connaissance et certains points n'ont pas encore pu être abordés, comme l'exercice d'optimisation en tant que tel.

Dans la suite de mes travaux de recherche, je souhaite renforcer mes recherches autour de la filière méthanisation dans un contexte de transition agroécologique, avec une forte interaction avec les besoins « terrains » des acteurs de la filière. En effet, je souhaite renforcer les liens déjà établis avec les agriculteurs méthaniseurs, acteurs centraux de la thématique. La gestion des compromis décrite précédemment est un enjeu primordial lié à cette question de recherche et je souhaite approfondir l'identification des antagonismes et des synergies entre production d'énergie et production de fertilisants organiques recyclables en agriculture. J'ai abordé cette notion dans le Chapitre 2 en définissant la méthodologie à suivre pour y parvenir, notamment en identifiant les services rendus, en proposant des indicateurs pour les quantifier, en investiguant les leviers d'actions (procédés et intrants) impactant les services rendus et en formalisant les résultats par des modèles de prédiction. Toutefois, il est nécessaire d'approfondir l'évaluation des antagonismes et des synergies en me basant sur les résultats obtenus.

De plus, j'ai à cœur de rentrer dans le vif du sujet concernant l'exercice d'optimisation à proprement parlé. Tout au long de mes recherches, j'ai proposé les outils nécessaires (indicateurs et modèles) pour mener à bien cet exercice. La suite logique est donc désormais de les utiliser à ce but afin d'affiner les questions de recherche à creuser. Le schéma de ma problématique de recherche présenté dans le Chapitre 2 (Figure 5) a été mis à jour (Figure 41) et propose de se focaliser sur **l'Ingénierie Inverse au service de l'optimisation multi-objectif de la filière** en répondant aux trois questions de recherche suivantes :

- Comment utiliser la caractérisation de la matière pour gérer les compromis entre services rendus (définition approfondie des besoins des agroécosystèmes, identification des variables pertinentes à suivre à partir d'une analyse de sensibilité poussée des outils développés et approfondissement de la connaissance et description des dites variables) ?
- Quels sont les processus biologiques impliqués dans le devenir de la matière dans la filière méthanisation ayant un impact sur les agroécosystèmes (approche mécanistique, identification leviers d'actions) ?
- Comment la compréhension des processus et les indicateurs développés permettent de répondre à l'optimisation de la filière de valorisation des résidus organiques dans une approche multi-critère ?
- Comment l'optimisation multi-objectif va permettre d'affiner les questions de recherche relatives aux axes 1 et 2 et à son tour d'alimenter ces deux axes ?

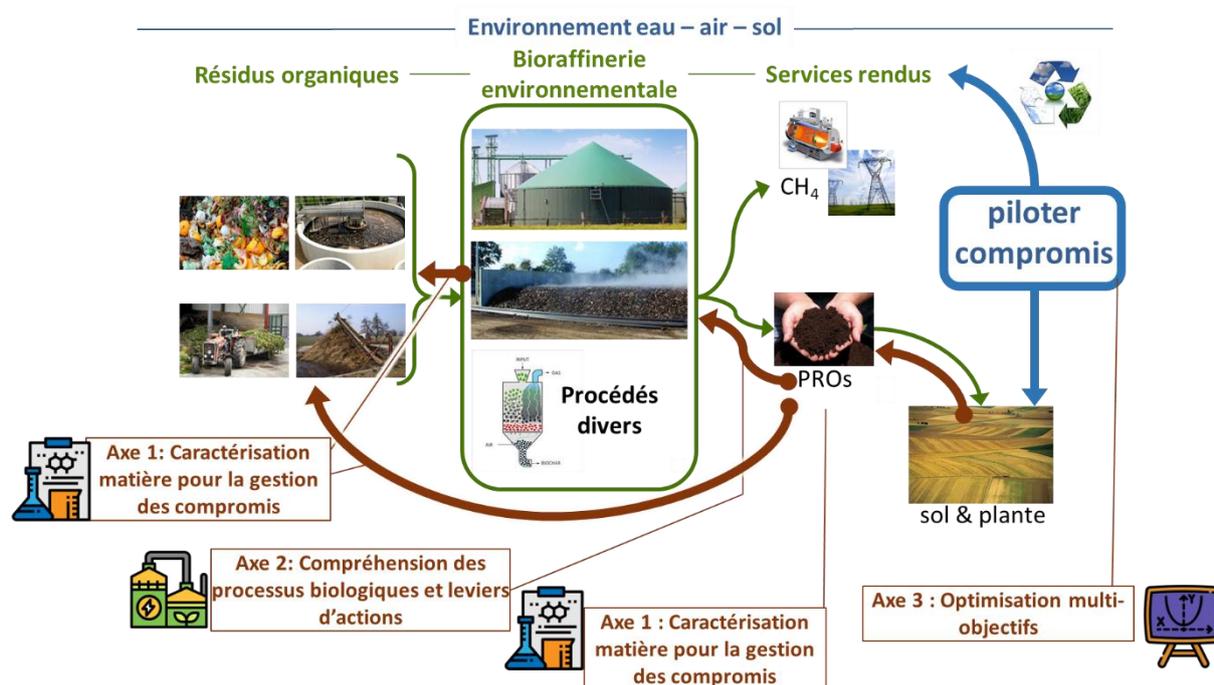


Figure 41 : Mise à jour de ma thématique de recherche déclinée en trois axes

Il est à noter que le système optimisé visé est la filière « procédés », du recettage optimum des intrants à la sortie de la filière. Cet exercice s'inscrit dans une volonté d'optimisation plus globale à l'échelle des exploitations, sous contraintes environnementales et sanitaires.

1. Axe 1 : Caractérisation et gestion des compromis

1.1. Variables de caractérisation pour affiner la description des services rendus (énergétiques et agroécologiques)

Dans un premier temps, je souhaite approfondir et affiner les liens entre produits issus des procédés de valorisation et besoins des agroécosystèmes afin de mieux identifier les synergies et antagonismes sur l'utilisation de la MO et des nutriments.

En effet, lors de mes travaux de recherche, j'ai commencé à définir les besoins des agroécosystèmes et des services écosystémiques rendus afin de proposer des indicateurs associés. Ces indicateurs ayant été validés par rapport aux réponses expérimentales biologiques, des questions restent en suspens concernant la qualité de la matière pour répondre aux besoins des agroécosystèmes, et plus précisément quelles variables issues de ces indicateurs sont à cibler/investiguer. Si le raisonnement est poussé un peu plus loin et que ces besoins sont analysés, tous les ingrédients nécessaires à les satisfaire sont présents en théorie dans les digestats (Figure 42).

Si l'on synthétise les besoins des agroécosystèmes, on peut distinguer trois fonctionnalités du sol à alimenter à plus ou moins court-long terme, à savoir la fertilité biologique (promouvoir la biodiversité via la mesofaune et microfaune du sol), la fertilité chimique (apporter les nutriments nécessaires, sous la bonne forme disponible, aux plantes et sol) et la fertilité physique (apporter de la MO stable pour garantir une bonne structure du sol). Donc théoriquement, les ingrédients sont là mais sous quelle forme ? Sont-ils disponibles, bioaccessibles, complexes ? Quels impacts environnementaux associés ? Quels effets sur les agroécosystèmes ?



Figure 42 : Adéquations et besoins des agroécosystèmes : théorie et questions de recherche

Des indicateurs de caractérisation pour décrire la bioaccessibilité, la complexité et la biodégradabilité de la MO ainsi que la disponibilité des nutriments (N et P) ont été développés et validés pour prédire certains des services rendus. Toutefois, la définition d'autres services rendus, comme l'utilisation de la MO par les microorganismes du sol, reste globale (carbone minéralisable au sol à court/moyen terme) et ne permet que partiellement d'apporter des éléments de réponse à la question sur l'impact de la méthanisation sur la MO du sol (à court, moyen et long terme).

En effet, il manque à définir un « cahier de charges » sur les propriétés spécifiques des besoins des agroécosystèmes pour réaliser une adéquation optimale entre qualités des PRO et les dits besoins.

Ainsi, je souhaite aller plus loin dans cette étude et répondre à plusieurs questions de recherche comme suit :

- Quelle qualité de MO serait plutôt souhaitable afin de mieux promouvoir la biodiversité ?
- Des molécules de type substances humiques-like seraient-elles à privilégier dans les digestats pour améliorer la stabilité structurale du sol ? La biodiversité ? Quel compromis à trouver entre MO labile et MO stable pour améliorer l'état d'un sol ? Quelle échelle de temps de biodégradation pour ces molécules ?
- Comment mesurer et quantifier les molécules conférant des propriétés de MO stable au digestat afin d'étudier leur provenance et devenir ? Est-ce que les indicateurs actuels sont suffisant pour cela ?
- Est-il est préférable de garder l'azote sous forme organique en contrôlant sa minéralisation au sol pour prévoir l'apport en azote aux plantes au moment désiré et ainsi prévenir les problèmes de volatilisation ?
- La méthanisation seule ou combinée avec d'autres procédés peut-elle répondre à ces besoins ? Si oui, comment ?

Ainsi je souhaite davantage me rapprocher de chercheurs (INRAE et hors INRAE) travaillant sur ces diverses fonctionnalités du sol afin de coupler nos approches et de mieux comprendre la biodégradation de la MO dans les sols et le devenir des nutriments dans les agroécosystèmes.

En parallèle, la gestion des compromis entre services rendus sur l'usage de la MO et nutriments déjà explicitée dans le Chapitre 2 n'a pas été approfondie. L'objectif est de mieux connaître la matière et son devenir dans les procédés et au-delà afin de contrôler sa production. La Figure 43 schématise ma vision de l'Axe 1 mis à jour avec les questions de recherche associées.

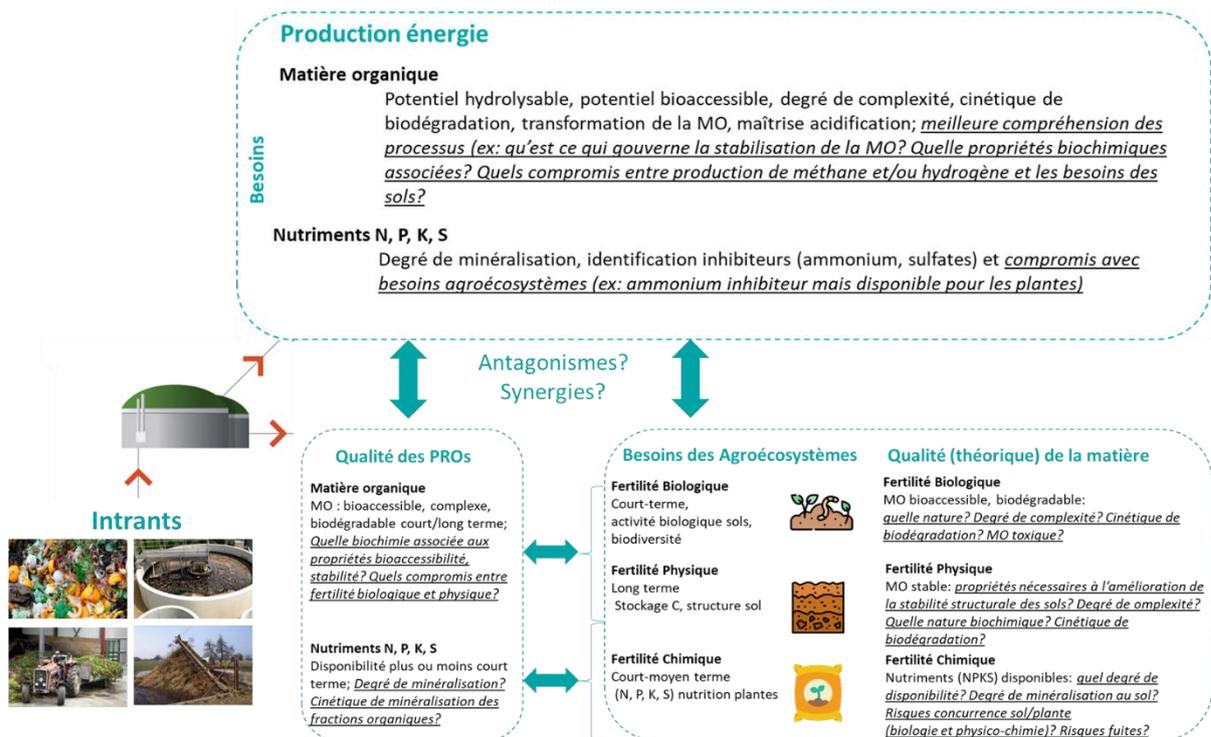


Figure 43 : Schématisation des questions de recherche associées à la gestion des compromis entre qualité des résidus organiques pour satisfaire les besoins pour la production d'énergie (méthanisation) et qualité des produits pour satisfaire les besoins des agroécosystèmes

Il est apparu très clairement, comme déjà évoqué dans le Chapitre 2, que des notions telles que la bioaccessibilité de la MO, sa complexité et la disponibilité des éléments sont des notions communes

nécessaires à une meilleure compréhension des besoins des agroécosystèmes et de la production d'énergie. Toutefois, les microorganismes impliqués dans les processus biologiques, leur biodiversité et synergies, les conditions opératoires (procédés) et pédo-climatiques (pour le sol) et les temps de dégradation ne sont pas les mêmes dans les bioprocédés et dans les sols. C'est pourquoi une meilleure connaissance des processus dans ces deux systèmes est importante afin de les coupler. En outre, un travail doit être mené de concert avec des spécialistes de la biodégradation de la MO dans les sols afin d'identifier les méthodes pertinentes à tester pour aller plus loin. Par exemple, des mesures de carbone organique RockEval sur les digestats ont commencé à être réalisées. Cette méthode de dégradation thermique a historiquement été mise en place afin de quantifier la teneur en carbone organique et le potentiel pétrolier des roches mères génératrices d'hydrocarbures. Elle a permis plus récemment de quantifier la teneur en carbone organique des sols. Des approches interprétatives spécifiques ont été proposées pour analyser la part de la MO des sols la plus réactive ou pour quantifier la part de carbone persistant dans le sol à l'échelle centennale.

D'autres méthodes innovantes peuvent également être regardées en collaboration comme la caractérisation via l'étude des propriétés énergétiques de la MO liées à son utilisation par les microorganismes des sols (Bölscher et al., 2016).

1.2. Variables de caractérisation fine pour la compréhension des processus

Dans un premier temps, je souhaite utiliser les données générées par l'axe 1 et les indicateurs développés afin de réaliser une analyse de sensibilité de la filière globale pour avoir une première réponse sur le poids des variables issues de la caractérisation sur celui des variables prédites (potentiel méthane, C_bio, N_miné...). La démarche que je souhaite mener est schématisée par la Figure 44.

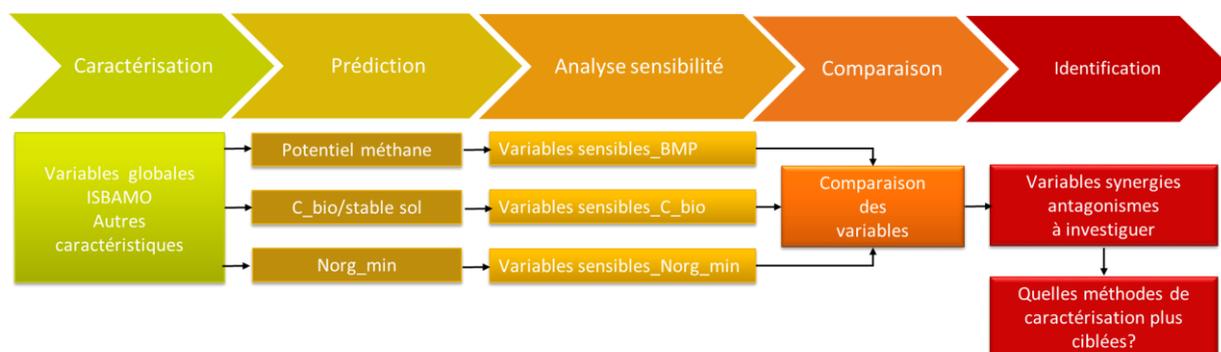


Figure 44 : Démarche à mettre en place pour déterminer les variables de caractérisation sensibles à la prédiction des services rendus

En effet, le modèle statistique PLS établi dans [JJ04] peut être couplé avec les modèles de prédiction du potentiel méthane (BMP) et du potentiel de Carbone minéralisable au sol (C_bio) publié dans [JJ18] puisque les variables explicatives sont les mêmes (i.e. ISBaMO®).

Comme évoqué précédemment, une analyse de sensibilité est à mettre en place sur les modèles de prédiction de la qualité des digestats et des services rendus afin d'évaluer l'impact de la méthanisation d'un substrat donné sur la qualité amendante de son digestat et sur son potentiel méthane. En comparant les variables ayant un poids significatif sur les différentes prédictions, les variables de caractérisation responsables des synergies et antagonismes sur lesquels aller investiguer peuvent être identifiées.

Dans un second temps et suite à cette analyse, les verrous de connaissance pourront être identifiés, les manques à combler en termes de caractérisation, voire le type de molécules à aller investiguer pour identifier des méthodes analytiques complémentaires pertinentes.

En outre, cet exercice viendra en parallèle alimenter l'axe 2 sur l'évaluation de leviers d'actions.

Par exemple, est-ce que certaines variables de caractérisation sont communes aux services rendus BMP et C_{bio} ? Si oui, comment gérer le compromis entre les deux et si non, comment faire en sorte d'augmenter cette synergie ?

Une revue de littérature réalisée dans le cadre de la thèse de David Fernandez-Dominguez [JJ01] a mis en évidence que des techniques spectrales complémentaires (comme Nuclear Magnetic Resonance et spectroscopie moyen infra-rouge) pourraient apporter un éclairage nouveau. Cette revue a également permis d'étudier les données existantes de la littérature en termes de devenir de la MO en méthanisation et d'ouvrir des perspectives d'études. Par exemple, l'identification de molécules complexes telles que les substances humiques-like pourraient permettre de mieux comprendre les processus de stabilisation de la MO pendant la méthanisation. En parallèle, la thèse de David Fernandez-Dominguez a mis en évidence que les méthodes statistiques d'interprétation des données spectrales avaient un impact significatif sur l'interprétation des résultats. Par exemple, en fluorimétrie 3D, l'utilisation de méthodes alternatives à celle développée et utilisée jusqu'à présent (régionalisation des spectres) pourrait permettre de considérer l'ensemble du spectre et de mieux appréhender la dynamique d'un changement dans un bioprocédé. Un travail en collaboration avec des statisticiens et des experts de la chimométrie permettra de donner un nouvel éclairage aux données et d'aller plus loin dans les interprétations et conclusions, voire les prédictions.

Enfin, on pourrait s'inspirer des travaux de thèse de (Robin Beghin, 2020) sur l'utilisation de l'isotopie du C et réaliser un suivi de molécules (C et N) sur l'ensemble d'une filière jusqu'aux services rendus afin d'aller plus loin dans cette évaluation de synergie/antagonismes, en utilisant des intrants de qualité de MO diverse.

1.3. Elaboration d'une base de données pour l'utilisation de la plateforme de modélisation

L'axe 3 a abouti à des modèles mécanistiques et statistiques capables de prédire divers services rendus de la filière. Or, ces modèles, notamment les modèles mécanistiques, sont gourmands en données et en paramètres stoechiométriques (i.e. fraction biodégradable du C et degré de minéralisation du N) et cinétiques (i.e. constantes d'hydrolyse).

L'IsBaMO[®] est un indicateur relativement rapide à obtenir mais l'estimation de la biodégradabilité de chaque fraction associée à sa constante d'hydrolyse nécessite soit de faire un bilan matière au sein du réacteur, soit de réaliser des tests de biodégradation sur des digestats acclimatés, expérimentations coûteuses en temps. Il en est de même pour le compostage où le potentiel de compostabilité est, pour le moment, géré par le banc de compostage mis en place, très long à suivre. Un des objectifs de cet axe est de continuer d'amender une base de données intrants avec les caractérisations matière associées ainsi que l'estimation de leur cinétique et degré de biodégradation en réalisant des tests BMP avec digestats acclimatés, des bilans matières et des identifications de paramètres sur les courbes de production de méthane obtenus. Durant les études menées dans l'axe 1 ces dernières années, j'ai pu trouver des corrélations entre fractions biodégradables et indice de complexité issu de la fluorimétrie de chaque fraction. Cette base pourrait valider cette corrélation et permettre de s'affranchir, *in fine*, de tels tests coûteux en temps.

La Figure 45 présente la démarche envisagée. Les intrants caractérisés seront également (quand cela est possible) caractérisés en termes de biodégradabilité anaérobie de la MO (C et N). Les tests laboratoires où une caractérisation fine (IsBaMO[®]) a été réalisée seront également pris en compte et inventoriés, que ce soit en méthanisation et compostage.

A partir de bilans matières et d'identification de paramètres de biodégradation, voire de calage de modèles, la base de données sera alimentée par l'ensemble de ces paramètres.

De plus, lorsque cela sera également possible, les digestats et/ou composts (voire certains intrants) seront mis en incubation sol afin de récupérer des données en C et N minéralisable et de compléter les données actuelles des modèles statistiques.

Un premier stage prévu début 2023 dans le cadre de la thèse de Margaud Pereme va commencer ce travail d'alimentation de la base, avec notamment un focus sur les tests BMP et une mise en place d'un protocole expérimental systématique à réaliser (inoculum acclimaté, suivi méthane, azote ammoniacal et bilan masse des fractions C et N).

Enfin, j'ai l'ambition d'aller jusqu'à la création d'un outil logiciel (base Rshiny) afin que les données soient facilement entrées, mises à jour et que l'on puisse visualiser, via des tests statistiques, les échantillons caractérisés et mettre à jour les modèles statistiques, voire en créer d'autres pour prédire des paramètres utiles à la modélisation à l'aide du machine learning. En effet, aujourd'hui, les bases de données ne sont pas systématiquement mises à jour et donc la validité des modèles créés non plus.

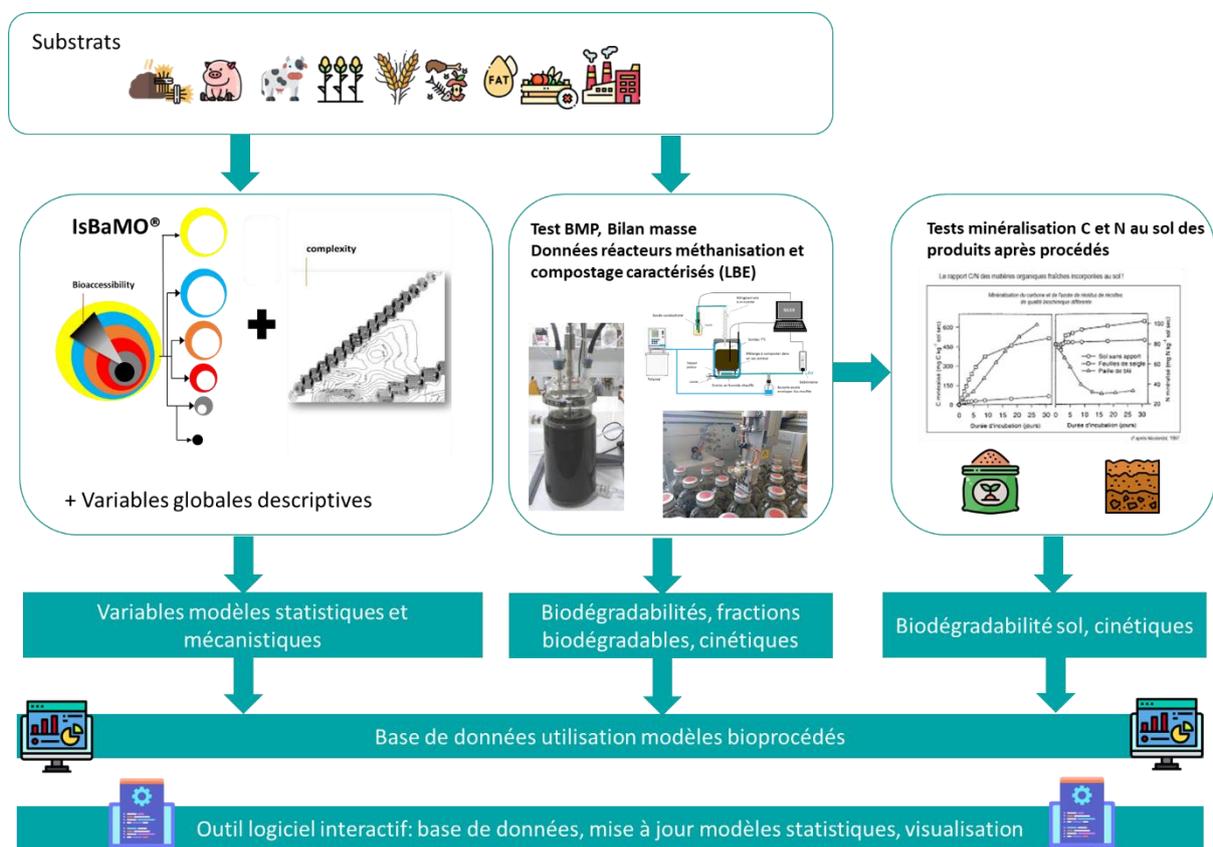


Figure 45 : Démarche envisagée pour mettre en place une base de données de caractérisation IsBaMO® durable et utilisable pour réaliser la modélisation de filière

2. Axe 2 : Compréhension des processus biologiques et leviers d'action

2.1. Etude des processus biologiques

Afin d'optimiser l'adéquation entre procédés et besoins issus des services rendus, les travaux commencés sur l'étude de la transformation de la MO pendant les procédés biologiques telles que la méthanisation sont à poursuivre. En effet, (Houot et al., 2022) a réalisé un premier bilan concernant l'impact de la méthanisation sur divers substrats (effluents d'élevage, CIVEs). Il apparaît que globalement la méthanisation a un effet de « stabilisation » de la MO observable expérimentalement via les cinétiques de minéralisations du C au sol. De plus, il a été observé que la fraction soluble d'un digestat a une couleur spécifique due aux acides humiques et acides fulviques. Des analyses spectrales ont corroboré cela [These_JJ] et des premiers tests de caractérisation des acides humiques par extraction alcaline également (Thèse Felipe Guilayn, 2019 ; projet Concept-Dig, 2019). Toutefois ces observations peuvent dépendre également des intrants de la méthanisation et des produits microbiens sécrétés selon les conditions opératoires des procédés.

Plusieurs hypothèses peuvent être émises afin d'expliquer les évolutions de la matière pendant la méthanisation mais restent à valider. Notamment l'augmentation de la complexité de la fraction DOM et des fractions facilement extractibles : est-ce dû seulement à la biodégradation de molécules simples ? A la génération de produits microbiens complexes ? A de l'humification ? Aux produits de l'hydrolyse des fractions moins accessibles vers les plus accessibles ? Comment découpler les processus pour les étudier ?

Toutes ces questions ont permis de proposer le sujet de thèse de David Fernandez-Dominguez en 2020 sur la caractérisation et modélisation du devenir de la MO pendant la méthanisation pour une meilleure utilisation des digestats en agriculture (Figure 46).

Afin de mieux comprendre ce phénomène de stabilisation et de mieux le piloter, la thèse s'intéresse à la part des molécules récalcitrantes à la biodégradation anaérobie provenant de sources exogènes (les intrants) et endogènes (les micro-organismes).

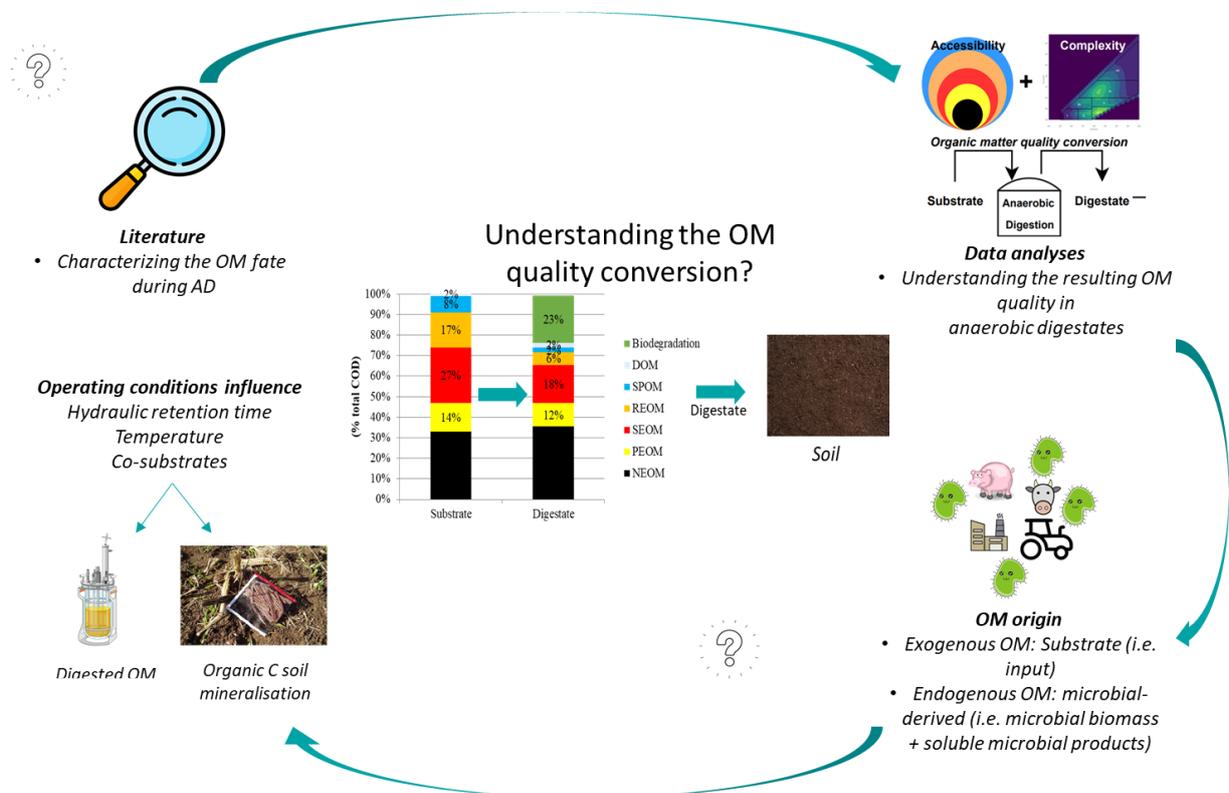


Figure 46 : Graphical abstract issu de la thèse de David Fernandez-Dominguez (2020-2023)

Les résultats sont en cours mais ont déjà commencé à montrer l'impact des produits endogènes sur la fraction soluble des digestats et que ces derniers peuvent avoir une signature de fluorescence différente selon le type d'inoculum [JJ36]. Une caractérisation via la Nuclear Magnetic Resonance (NMR) en collaboration avec l'université de Linköping (Suède) et une caractérisation des microorganismes ont été utilisées pour également caractériser la MO en sortie de digesteurs pilotes alimentés par des intrants réels versus intrants synthétiques. L'objectif était de découpler les sources de MO récalcitrante exogène (intrant réel) de la production de MO récalcitrante exogène (intrant synthétique biodégradable). Les résultats sont en cours d'interprétation. Certains sont prometteurs avec notamment une hypothèse sur l'impact des voies métaboliques sur la qualité de la MO comme déjà proposée par certains articles de la littérature [JJ01]. Comme proposé dans l'axe 1, l'utilisation d'un traçage isotopique pour découpler MO exogène/endogène pendant la méthanisation, avec divers intrants et conditions opératoires, pourrait permettre de quantifier les flux et la part de chacune dans la MO contenue dans le digestat.

De plus, afin de palier au manque de découplage intrants/conditions opératoires de la méthanisation, l'impact de ces dernières comme le temps de séjour, la température et la ration d'intrants sur la qualité de la MO et son devenir au sol seront également évalués dans le cadre de cette thèse.

En outre, comme décrit dans les perspectives de l'axe 1, l'analyse de sensibilité des modèles mis en place va permettre d'identifier des variables de caractérisation à investiguer et donc d'améliorer la connaissance des processus biologiques de la méthanisation pour mieux les modéliser et optimiser la filière dans son ensemble. Dans ce sens les axes 1 et 2 évolueront de concert et continueront d'apporter des éléments pour l'axe 3.

2.2. Leviers d'actions et hiérarchisation

Concernant l'identification des leviers d'actions, les travaux sur l'étude de la variabilité des digestats se poursuivent. Il a été montré précédemment par diverses études ([JJ12], [PO7], [JJ33]) que la variabilité des intrants et la variabilité des traitements ont un impact significatif sur la qualité agronomique des digestats et une typologie a été dans un premier temps proposée. Cette variabilité est une opportunité afin de mettre en adéquation digestat produit et besoins des agrosystèmes (Figure 47). Toutefois, cette variabilité que l'on souhaite rationaliser doit être raisonnée avec la variabilité des pratiques agricoles afin de répondre aux verrous de connaissance et questions associées à la variabilité des effets observables sur les agroécosystèmes : y a-t-il une typologie d'effets, d'impacts sur les besoins des agroécosystèmes ? Quelles relations avec les variabilités citées précédemment ? Et si oui quelle hiérarchie ?

Afin de répondre en partie à cette question, le projet Ferti-Dig que je coordonne (ADEME-GRDF, 2021-2024) est en cours. L'ambition de Ferti-Dig est d'approfondir la typologie des digestats proposée par Concept-Dig en inventoriant les données disponibles à la fois dans la bibliographie et en France. L'objectif principal étant de produire un guide d'utilisation agronomique des digestats basé sur leurs typologies, à destination des agriculteurs et des conseillers agricoles. Les questions de recherche autour de la corrélation entre typologies des digestats et typologies des effets vont être également regardées. Dans ce projet, les effets considérés sont l'activité biologique du sol via l'étude des vers de terre, la stabilité structurale du sol et le potentiel de fertilisation azotée via la mesure de coefficient équivalent azote issus d'essais aux champs.

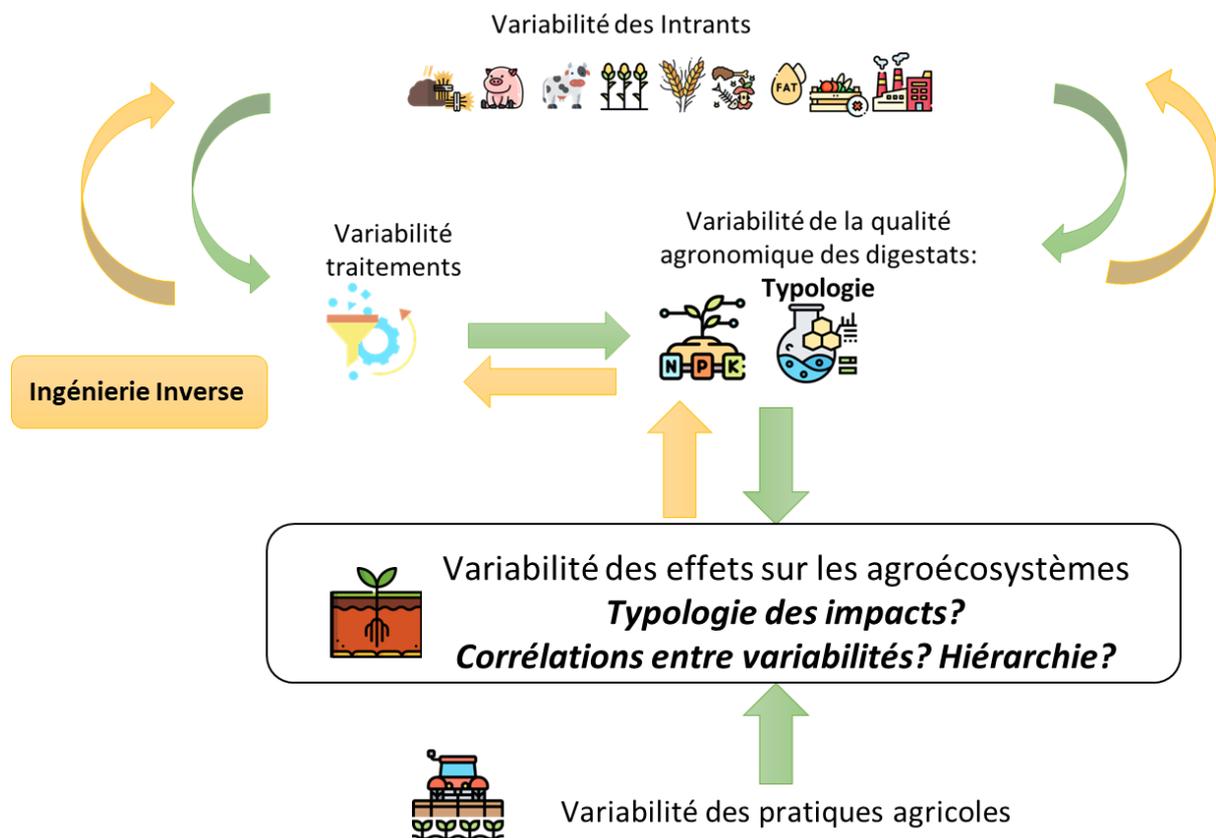


Figure 47 : Questions de recherche associées à la rationalisation et compréhension de la variabilité de la qualité agronomique des digestats et leurs impacts sur les agroécosystèmes

Les réponses apportées pourront permettre de mieux appréhender les effets des digestats sur les agroécosystèmes, de les classer selon une certaine typologie à affiner (intrants, procédés), ce qui donnera, *in fine*, l'opportunité d'utiliser la variabilité de ces produits comme levier d'action afin de mettre en adéquation les besoins des agroécosystèmes et la qualité des fertilisants organiques issus de la méthanisation via de l'ingénierie inverse.

2.3. Post-traitements

Je souhaite également poursuivre des travaux sur les traitements de digestats d'alimenter la « bibliothèque » de procédés possibles dans la filière méthanisation et plus largement de la Bioraffinerie Environnementale afin d'augmenter les possibilités de pilotage de la qualité des digestats et co-produits en sortie.

Les pertes en azote sont un enjeu pour le digestat. Certains digestats (d'origine urbaine) ont, en plus, d'autres enjeux comme la non-conformité aux normes en vigueur et le coût de transport des produits. Ainsi, je souhaite continuer à travailler sur le développement de solutions. Dans ce sens là, le projet en collaboration avec SUEZ, basé sur la Thèse de Felipe Guilayn (2019) sur les digestats d'origine urbaine va se poursuivre (cf. Fait Marquant Axe 2). Pour rappel, les deux voies de traitements considérées étaient une voie dite de « fractionnement » et la seconde de « conservation » de la matière. Dans la première, une extraction alcaline suivie d'une séparation de phases permet d'extraire des molécules d'intérêt type acides humiques ayant un fort potentiel de biostimulation pour les plantes tout en récupérant l'azote ammoniacal par stripping. L'étude et la caractérisation de ces extraits permettront également d'alimenter ma réflexion sur la compréhension des processus de stabilisation durant la méthanisation. Dans la seconde voie de traitement, un apport d'acide permet de conserver l'azote ammoniacal dans le digestat et un séchage doux en dépression permet de sécher le digestat, de

concentrer sa matière et de l'hygiéniser afin de le rendre facilement transportable et utilisable en agronomie. De plus, les tests agronomiques sur l'effet biotimulant des extractions issues des digestats sont en cours ainsi que les analyses nécessaires à la normalisation des digestats acidifiés et séchés.

Enfin, étant donné que ma démarche est basée sur de l'ingénierie inverse, je souhaite également utiliser les besoins des agroécosystèmes comme cahier des charges pour concevoir des solutions innovantes en termes de procédés de traitement. En effet, la variabilité des intrants est un levier d'action significatif majeur. Toutefois, selon les installations en place et les contraintes des gisements des résidus disponibles dans le territoire, il est difficile de moduler la recette intrante. Dans ces cas-là, le levier d'action « post-traitements » est une solution à envisager.

3. Axe 3 : Modélisation et Optimisation : Ingénierie inverse

3.1. Modélisation des bio/procédés

Concernant les perspectives en terme de modélisation, des verrous restent à lever et génèrent des pistes de recherche à investiguer. Jusqu'à présent, mes travaux se sont focalisés sur la modélisation des procédés et du devenir de leur qualité, que ce soit via des modèles mécanistes ou statistiques. La thèse en cours de Margaud Pereme (2020-2023) a déjà permis de mettre en place une plateforme de simulation couplant modèles de méthanisation, post-traitements classiques et devenir des digestats au sol. Toutefois, ces modèles sont gourmands en données d'entrées et en calage de paramètres stoechiométriques (i.e. fraction biodégradable du C et degré de minéralisation du N) et cinétiques (i.e. constantes d'hydrolyse). C'est pourquoi, je souhaite continuer la compilation de données de substrats caractérisés avec, en parallèle, l'identification des paramètres associés comme évoqué dans les perspectives de l'axe 1.

Un verrou important a été identifié dans l'axe 1 du Chapitre 2 : la modélisation de la co-digestion comme illustrée par la Figure 48. En effet, que ce soit dans les modèles mécanistes ou statistiques, les données d'entrée ont été caractérisées par intrant voire par mélange d'intrants déjà préparé. Or, malgré le fait que le fractionnement IsBaMO® soit additif, la fluorescence ne l'est pas et les questions sur les cinétiques d'hydrolyse, les synergies voire les interactions entre substrats n'ont pas été résolues. En effet, dans la littérature, les cinétiques de biodégradation entre co-substrats peuvent être additives selon le type de substrats et leur nombre. Par exemple, en considérant deux substrats, l'additivité existe (Kouas et al., 2018) mais au-delà et selon le type de substrats, cette additivité ne fait plus consensus et des phénomènes d'interactions apparaissent (Karki et al., 2022, 2021; Pagés Díaz et al., 2011; Xie et al., 2017). Ainsi, lorsque nous sommes face à un problème de simulation de la méthanisation avec plusieurs intrants (comme c'est le cas dans la majorité des méthaniseurs agricoles et territoriaux en France), comment modéliser leur biodégradation ?

Concernant la modélisation mécanistique, jusqu'à aujourd'hui, ma stratégie a été de faire une somme pondérée des fractions de chaque intrant en fonction de leur proportion en entrée, mais la détermination de leur biodégradabilité et leur constante d'hydrolyse est toujours source d'incertitude et bien souvent je cale les paramètres sur des données expérimentales. Ainsi, si l'on veut utiliser une base de données de paramètres et de paramètres associés, il faut aussi mettre en place une méthodologie d'utilisation de ces données pour la co-digestion. Une telle méthodologie n'existe pas, à ma connaissance. C'est pourquoi, je souhaite proposer un projet de thèse sur le sujet.

Actuellement, je suis la thèse de Lucie Perat (INRAE, LBE) supervisée par Eric Trably, sur la production d'hydrogène et la co-digestion. Lucie Perat utilise le fractionnement IsBaMO® et réalise des tests de co-fermentation avec divers constituants d'un biodéchet reconstitué. Les résultats préliminaires montrent qu'il n'y aurait pas additivité de la production d'hydrogène et que le fractionnement pourrait être un moyen de mieux comprendre la « règle » d'utilisation des substrats par les microorganismes, en lien avec les résultats publiés sur la modélisation simultanée ou séquentielle des fractions d'un substrat [JJ10]. Cet aspect est à creuser afin de proposer des expérimentations dédiées et de proposer une méthodologie pour la simulation de la co-digestion. En effet, on pourrait imaginer de mettre en place des expérimentations supplémentaires à celles de la thèse de Lucie Perat avec un suivi poussé afin de modéliser la co-digestion, que ce soit de manière mécanistique (afin de mieux comprendre les processus) ou à l'aide du machine learning afin de proposer une méthodologie/règle d'utilisation des données de co-digestion (Figure 48). J'ajouterais que l'utilisation du traçage isotopique selon les abondances naturelles du ¹³C ou ¹⁵N voire via un traçage de molécules marquées sur divers types d'intrants en co-digestion serait intéressant d'investiguer et pourrait participer à répondre à la question.

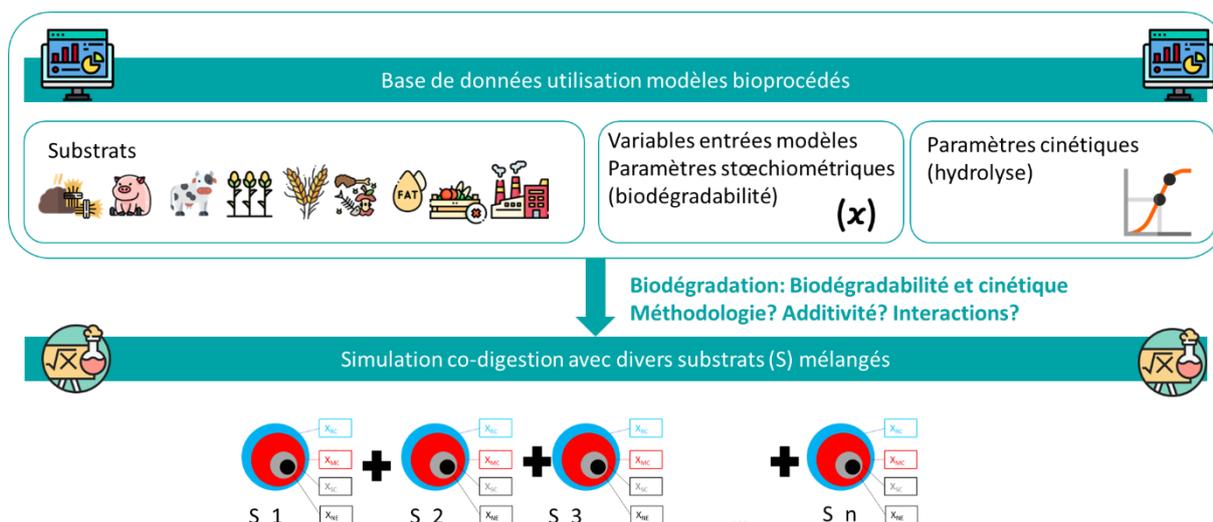


Figure 48 : Schématisation de la problématique de recherche autour de la modélisation de la co-digestion des intrants en méthanisation

Concernant la modélisation statistique, étant donné que la fluorescence n'est pas additive, l'utilisation de l'IsBaMO® ne peut être réalisée que si la caractérisation est faite sur le mix des intrants. L'autre solution serait de réaliser la modélisation par substrat et de pondérer les résultats avec la même incertitude que précédemment évoquée. Là aussi, des investigations sont à prévoir.

Enfin, l'axe 2 et la poursuite de travaux sur une meilleure compréhension des procédés permettra également de mettre à jour les modèles actuels.

3.2. Optimisation multi-objectif et couplage avec ACV

Enfin, un dernier enjeu à aborder est celui de l'optimisation multi-objectif de la filière. Jusqu'à présent, mes travaux se sont focalisés sur la modélisation des procédés et du devenir de leur qualité, que ce soit via des modèles mécanistiques ou statistiques. La thèse en cours de Margaud Pereme (2020-2023) a déjà permis de mettre en place une plateforme de simulation couplant modèles mécanistiques de méthanisation, post-traitements et devenir des digestats au sol. Les deux prochaines étapes sont de coupler cette modélisation au calcul des impacts environnementaux comme proposé par ACV et de réaliser une optimisation multi-objectif en utilisant des exemples d'étude de cas.

La première étape va nous permettre de mettre en exergue (i) les calculs non pris en compte dans la plateforme mais nécessaires pour l'ACV, (ii) la sensibilité de certains éléments de la filière sur les impacts environnementaux comme la recette des intrants, la gestion du stockage, les paramètres procédés et (iii) l'impact de la dynamique de la filière (perturbations systèmes, montée en charge organique, changement de recette saisonnière, ...).

La seconde étape va ensuite consister en l'implémentation d'un algorithme d'optimisation multi-objectif (i.e. choix de l'algorithme génétique à valider d'après (Gésan-Guizou, 2022)) appliqué à des études de cas/scénarios. Lors de cette étape, nous aurons à définir les contraintes environnementales et réglementaires, les objectifs à atteindre pour la production d'énergie et la production de fertilisants organiques ainsi que les paramètres sur lesquels jouer à partir de l'analyse de sensibilité précédente. Cet exercice ambitieux nous donnera un éclairage nouveau sur la gestion des compromis entre services rendus, l'impact de changements sur l'environnement et soulèvera des pistes à creuser pour aller plus loin dans l'analyse.

A ce sujet, je souhaiterais me rapprocher et m'inspirer des travaux proposés par les chercheurs du département TRANSFORM (Gésan-Guizou et al., 2019) dans d'autres disciplines (agro-alimentaires,

alimentaires, ...) utilisant des outils d'optimisation et ayant développé un réseau sur le sujet au sein même de l'INRAE.

Le schéma de la Figure 49 s'inspire des livrables attendus de la thèse de Margaud Pereme (2023) qui s'inscrit dans une ambition d'optimisation plus générale avec des allers-retours entre optimisation et simulations, la définition du cahier des charges affiné (axe 1) selon le cas étudié (sol, conditions pédo-climatiques, cultures), l'utilisation des leviers d'actions identifiés (axe 2 : substrats, procédés) et d'une base de données substrats associée à la méthodologie développée de modélisation de la co-digestion si l'on réalise cette optimisation à partir de modèles mécanistiques.

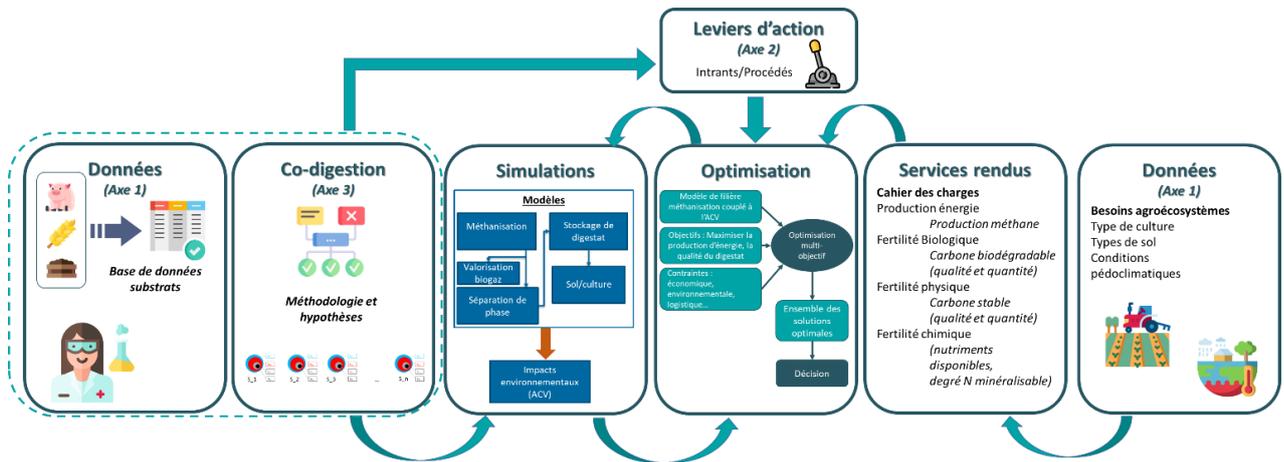


Figure 49 : Optimisation multi-objectif des services rendus par la filière méthanisation alimentée par les trois Axes de recherche

Les résultats des analyses effectuées et des optimisations permettront de prioriser les efforts à mettre en œuvre dans le degré de connaissance sur la filière méthanisation et d'alimenter les recherches des deux premiers axes et de générer des nouvelles questions de recherche. En effet, comme illustré par la Figure 50, l'optimisation multi-objectif pourra proposer à son tour des besoins et des pistes à creuser sur les trois axes de recherche.

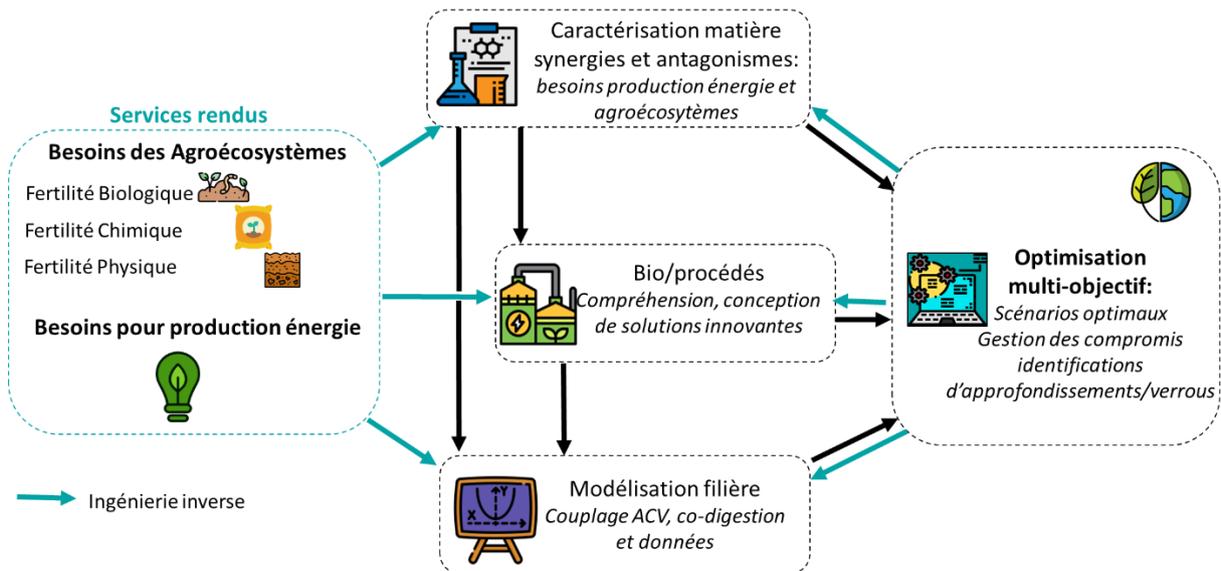


Figure 50 : L'ingénierie inverse, au-delà de l'optimisation multi-objectif de la filière de valorisation des résidus organiques

Ainsi l'ingénierie inverse à partir des services rendus via les besoins des agroécosystèmes est au cœur de mon projet de recherche, que ce soit pour mieux connaître la matière et son devenir et éco-concevoir des filières de valorisation optimales respectueuses de l'environnement, génératrices de gaz verts et en adéquation avec les principes de l'agroécologie (Figure 50).

3.3. Perspectives à long terme

Dans une vision à plus long terme de mes recherches, je souhaiterais élargir ma méthodologie à l'ensemble de la bioraffinerie environnementale, au-delà de la filière méthanisation, cas d'étude pour développer ladite méthodologie. En effet, la bioraffinerie environnementale comme définie au LBE vise à concevoir une filière de valorisation optimale d'un résidu donné dont la qualité matière est connue, tout en optimisant la combinaison des briques technologiques disponibles dans notre bibliothèque « d'outils bio/procédés » afin de proposer divers scénarios possibles de valorisation.

Les services rendus pouvant être divers, ils devront intégrer le devenir agronomique du co-produit final et donc de considérer son adéquation avec les besoins des agroécosystèmes. Ces propositions de scénari seront, comme décrit dans l'axe 3, obtenus via une méthodologie d'optimisation multi-objectif prenant en compte les objectifs souhaités par les services rendus aux divers bio/procédés possibles sous contraintes environnementales et sanitaires comme illustré par la Figure 51.

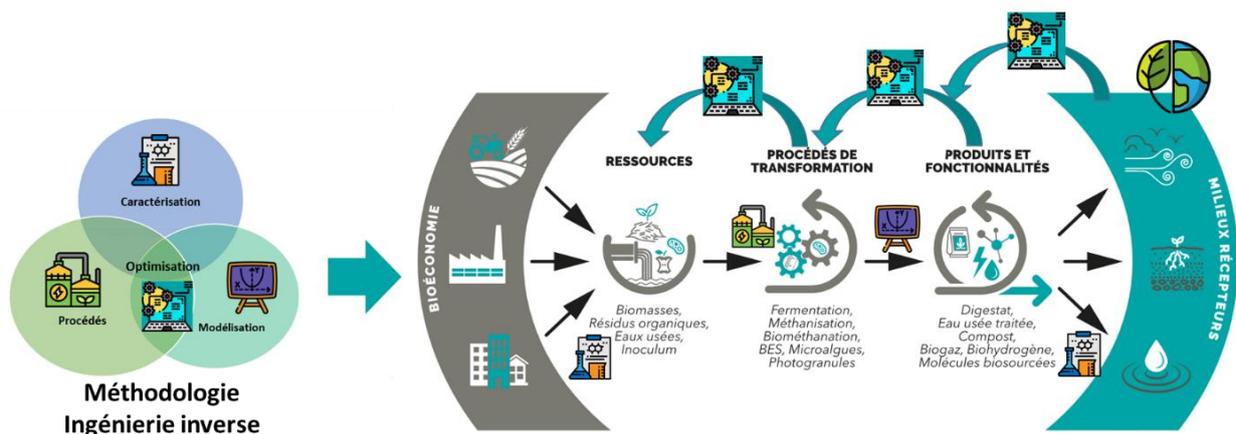


Figure 51 : Vision long-terme de ma thématique de recherche

Conclusion sur mes activités de recherche

Mes diverses expériences en tant qu'ingénieure de recherche dans le privé puis chargée de recherche dans l'académique m'ont permis de développer une activité de recherche autour de *l'intégration de bioprocédés de valorisation des résidus organiques pour une gestion durable des agroécosystèmes* dont les piliers font référence à mes compétences en caractérisation de la matière, génie des procédés et modélisation des procédés.

Dans un premier temps, j'ai utilisé ces compétences afin de construire ma thématique de recherche. Aujourd'hui, je souhaite consolider cette dernière, la diriger et la développer pour mieux la partager.

Durant mes expériences, j'ai eu l'opportunité de piloter des projets de recherche et d'encadrer des techniciens, stagiaires (DUT à master et ingénieurs), ingénieurs, post-doctorants et doctorants. Cela m'a permis d'avoir une expérience en direction de projet et en encadrement. La dynamique de mes activités montre que je suis prête à diriger des thèses et assumer la direction d'une thématique de recherche. J'apprécie de transmettre aux jeunes chercheurs la capacité à répondre à une thématique de recherche et à définir les questions de recherche autour d'une thèse qu'ils défendront.

D'un autre côté, l'expérience d'encadrer des doctorants me nourrit et me pousse à prendre du recul et de la hauteur vis-à-vis des résultats de recherche obtenus et des réflexions. C'est une expérience de partage mutuel où j'accompagne les jeunes chercheurs afin qu'ils s'approprient un sujet et eux m'apportent de nouvelles approches et réflexions nourrissant mes propres recherches.

Je souhaite donc poursuivre dans cette voie afin de pouvoir continuer ces synergies et alimenter ma thématique de recherche. Enfin, la possibilité de pouvoir expertiser des recherches (rapporter des thèses, HDR, projets ...) me permettra d'ouvrir encore plus de perspectives.

Références Bibliographiques

- Altieri, M.A., 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 1–24. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(02\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(02)00085-3)
- Angelidaki, I., Sanders, W., 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* 3, 117–129. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3>
- Aquino, S.F., Chernicharo, C.A.L., Soares, H., Takemoto, S.Y., Vazoller, R.F., 2008. METHODOLOGIES FOR DETERMINING THE BIOAVAILABILITY AND BIODEGRADABILITY OF SLUDGES. *Environ. Technol.* 29, 855–862. <https://doi.org/10.1080/09593330802015508>
- Bareha, Y., Affes, R., Moinard, V., Buffet, J., Girault, R., 2021. A simple mass balance tool to predict carbon and nitrogen fluxes in anaerobic digestion systems. *Waste Manag.* 135, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.020>
- Bareha, Y., Girault, R., Guezel, S., Chaker, J., Trémier, A., 2019. Modeling the fate of organic nitrogen during anaerobic digestion: Development of a bioaccessibility based ADM1. *Water Res.* 154, 298–315. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.011>
- Barles, S., 2005. L'invention des déchets urbains, France, 1790-1970. *Champ vallon*.
- Bayard, R., Benbelkacem, H., Gourdon, R., Buffière, P., 2018. Characterization of selected municipal solid waste components to estimate their biodegradability. *J. Environ. Manage.* 216, 4–12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.087>
- Cavalli, D., Corti, M., Baronchelli, D., Bechini, L., Marino Gallina, P., 2017. CO₂ emissions and mineral nitrogen dynamics following application to soil of undigested liquid cattle manure and digestates. *Geoderma* 308, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.027>
- Chauvin, M., 2004. Enjeux de la valorisation des déchets ou produits résiduaux organiques en Bretagne.
- Chen, W., Westerhoff, P., Leenheer, J.A., Booksh, K., 2003. Fluorescence Excitation–Emission Matrix Regional Integration to Quantify Spectra for Dissolved Organic Matter. *Environ. Sci. Technol.* 37, 5701–5710. <https://doi.org/10.1021/es034354c>
- de la Fuente, C., Albuquerque, J.A., Clemente, R., Bernal, M.P., 2013. Soil C and N mineralisation and agricultural value of the products of an anaerobic digestion system. *Biol. Fertil. Soils* 49, 313–322. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0719-9>
- Dou, Z., Toth, J.D., Galligan, D.T., Ramberg, C.F., Ferguson, J.D., 2000. Laboratory Procedures for Characterizing Manure Phosphorus. *J. Environ. Qual.* 29, 508–514. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900020019x>
- Esparza-Soto, M., Westerhoff, P.K., 2001. Fluorescence spectroscopy and molecular weight distribution of extracellular polymers from full-scale activated sludge biomass. *Water Sci. Technol.* 43, 87–95.
- Garcia-Bernet, D., Daboussi, F., 2016. Bioraffinerie environnementale et les usages en cascade de la biomasse. *Innov. Agron.* 54, 75–88.
- Garnier, P., Néel, C., Aita, C., Recous, S., Lafolie, F., Mary, B., 2003. Modelling carbon and nitrogen dynamics in a bare soil with and without straw incorporation. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 555–568. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00499.x>

Références Bibliographiques

- Gerke, J., 2015. Phytate (Inositol Hexakisphosphate) in Soil and Phosphate Acquisition from Inositol Phosphates by Higher Plants. A Review. *Plants* 4, 253–266. <https://doi.org/10.3390/plants4020253>
- Gésan-Guiziou, G., 2022. Evaluation Multicritère, EMC et variabilité, in: Séminaire de Département Transform INRAE, Département Transform INRAE. Massy.
- Gésan-Guiziou, G., Alaphilippe, A., Andro, M., Aubin, J., Bockstaller, C., Botreau, R., Buche, P., Collet, C., Darmon, N., Delabuis, M., Girard, A., Grateau, R., Kansou, K., Martinet, V., Membré, J.-M., Sabbadin, R., Soler, L.-G., Thiollet-Scholtus, M., Tonda, A., Van-Der-Werf, H., 2019. Annotation data about multi criteria assessment methods used in the agri-food research: The french national institute for agricultural research (INRA) experience. *Data Br.* 25, 104204. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104204>
- Giovanela, M., Parlanti, E., Soriano-Sierra, E.J., Soldi, M.S., Sierra, M.M.D., 2004. Elemental compositions, FT-IR spectra and thermal behavior of sedimentary fulvic and humic acids from aquatic and terrestrial environments. *Geochem. J.* 38, 255–264. <https://doi.org/10.2343/geochemj.38.255>
- Grau, P., Vanrolleghem, P., Ayesa, E., 2007. BSM2 Plant-Wide Model construction and comparative analysis with other methodologies for integrated modelling. *Water Sci. Technol.* 56, 57–65. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.602>
- GRDF, 2022. La dynamique du marché [WWW Document]. <https://projet-methanisation.grdf.fr/la-methanisation/la-dynamique-du-marche>.
- Grigatti, M., Boanini, E., Cavani, L., Ciavatta, C., Marzadori, C., 2015. Phosphorus in Digestate-Based Compost: Chemical Speciation and Plant-Availability. *Waste and Biomass Valorization* 6, 481–493. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9383-2>
- Grigatti, M., Di Girolamo, G., Chincarini, R., Ciavatta, C., Barbanti, L., 2011. Potential nitrogen mineralization, plant utilization efficiency and soil CO₂ emissions following the addition of anaerobic digested slurries. *Biomass and Bioenergy* 35, 4619–4629. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.09.007>
- Gunaseelan, V.N., 2007. Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition. *Bioresour. Technol.* 98, 1270–1277. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.05.014>
- Gunnarsson, A., Bengtsson, F., Caspersen, S., 2010. Use efficiency of nitrogen from biodigested plant material by ryegrass. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 173, 113–119. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800250>
- He, Z., Zhang, H., Toor, G.S., Dou, Z., Honeycutt, C.W., Haggard, B.E., Reiter, M.S., 2010. Phosphorus Distribution in Sequentially Extracted Fractions of Biosolids, Poultry Litter, and Granulated Products. *Soil Sci.* 175, 154–161. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181dae29e>
- Henze, M., Gujer, W., Lino, T., van Loosdrecht, M.C.M., 2000. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. IWA Publishing.
- Houot, S., Levavasseur, F., Launay, C., Moinard, V., Carton, S., Girault, R., 2022. Effet de la méthanisation sur les flux de matière organique au sein des exploitations, in: Workshop Agroécologie et Méthanisation Rennes (2022-10-19-2022-10-20).
- Jeppsson, U., Pons, M.-N., Nopens, I., Alex, J., Copp, J.B., Gernaey, K.V., Rosen, C., Steyer, J.-P., Vanrolleghem, P.A., 2007. Benchmark simulation model no 2: general protocol and exploratory case studies. *Water Sci. Technol.* 56, 67–78. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.604>

Références Bibliographiques

- Jeuffroy, M.-H., 2022. Agroécologie: entre recherche et innovation, in: Workshop Agroécologie et Méthanisation Rennes (2022-10-19-2022-10-20). Rennes.
- Journal Officiel de la République Française, 2020. Arrêté du 22 octobre 2020 approuvant un cahier des charges pour la mise sur le marché et l'utilisation de digestats de méthanisation d'intrants agricoles et/ou agro-alimentaires en tant que matières fertilisantes.
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K.C., Shrestha, S., Raskin, L., Sung, S., Hashimoto, A., Kumar Khanal, S., 2021. Anaerobic co-digestion: Current status and perspectives. *Bioresour. Technol.* 330, 125001. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125001>
- Karki, R., Chuenchart, W., Surendra, K.C., Sung, S., Raskin, L., Khanal, S.K., 2022. Anaerobic co-digestion of various organic wastes: Kinetic modeling and synergistic impact evaluation. *Bioresour. Technol.* 343, 126063. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126063>
- Kaza, S., Yao, L.C., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F., 2018. *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank.
- Kouas, M., Torrijos, M., Schmitz, S., Sousbie, P., Sayadi, S., Harmand, J., 2018. Co-digestion of solid waste: Towards a simple model to predict methane production. *Bioresour. Technol.* 254, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.055>
- LAMBERS, H., SHANE, M.W., CRAMER, M.D., PEARSE, S.J., VENEKLAAS, E.J., 2006. Root Structure and Functioning for Efficient Acquisition of Phosphorus: Matching Morphological and Physiological Traits. *Ann. Bot.* 98, 693–713. <https://doi.org/10.1093/aob/mcl114>
- Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M.L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., 2010. Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization. *Bioresour. Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.025>
- Lashermes, G., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Thuriès, L., Chaussod, R., Guillotin, M.L., Linères, M., Mary, B., Metzger, L., Morvan, T., Tricaud, A., Villette, C., Houot, S., 2009. Indicator of potential residual carbon in soils after exogenous organic matter application. *Eur. J. Soil Sci.* 60, 297–310. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01110.x>
- Lesteur, M., Latrille, E., Maurel, V.B., Roger, J.M., Gonzalez, C., Junqua, G., Steyer, J.P., 2011. First step towards a fast analytical method for the determination of Biochemical Methane Potential of solid wastes by near infrared spectroscopy. *Bioresour. Technol.* 102, 2280–2288. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.044>
- Liu, X., Bayard, R., Benbelkacem, H., Buffière, P., Gourdon, R., 2015. Evaluation of the correlations between biodegradability of lignocellulosic feedstocks in anaerobic digestion process and their biochemical characteristics. *Biomass and Bioenergy* 81, 534–543. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.06.021>
- Malézieux, E., Lafontaine, H.O., 2013. Agro-écologie : quels principes dans les agro-écosystèmes tropicaux ?, in: <http://www.inra.fr/Entreprises-Monde-agricole/Resultats-innovation-transfert/Tous-les-magazines/SIA-2013-Rencontre-AgroEcologie> (Ed.), . Paris.
- Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., van Wesemael, B., Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

Références Bibliographiques

- Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition Énergétique, 2021. Traitement des déchets [WWW Document]. <https://www.ecologie.gouv.fr/traitement-des-dechets>.
- Morvan, T., Nicolardot, B., Péan, L., 2006. Biochemical composition and kinetics of C and N mineralization of animal wastes: a typological approach. *Biol. Fertil. Soils* 42, 513–522. <https://doi.org/10.1007/s00374-005-0045-6>
- Mottet, A., François, E., Latrille, E., Steyer, J.P., Déléris, S., Vedrenne, F., Carrère, H., 2010. Estimating anaerobic biodegradability indicators for waste activated sludge. *Chem. Eng. J.* 160, 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.03.059>
- Oudart, D., Robin, P., Paillat, J.M., Paul, E., 2015. Modelling nitrogen and carbon interactions in composting of animal manure in naturally aerated piles. *Waste Manag.* 46, 588–598. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.044>
- Pagés Díaz, J., Pereda Reyes, I., Lundin, M., Sárvári Horváth, I., 2011. Co-digestion of different waste mixtures from agro-industrial activities: Kinetic evaluation and synergetic effects. *Bioresour. Technol.* 102, 10834–10840. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.031>
- Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., Augusto, L., Balesdent, J., Basile-Doelsch, I., Bellassen, V., Cardinael, R., Cécillon, L., Ceschia, E., Chenu, C., Constantin, J., Darroussin, J., Delacote, P., Delame, N., Gastal, F., Gilbert, D., Graux, A.-I., Guenet, B., Houot, S., Klumpp, K., Letort, E., Litrico, I., Martin, M., Menasseri, S., Mézière, D., Morvan, T., Mosnier, C., Roger-Estrade, J., Saint-André, L., Sierra, J., Théron, O., Viaud, V., Grateau, R., Le Perchec, S., Savini, I., Réchauchère, O., 2019. Stocker du carbone dans les sols français: quel potentiel au regard de l'objectif de 4 pour 1000 et à quel coût?
- Peltre, C., Thuriès, L., Barthès, B., Brunet, D., Morvan, T., Nicolardot, B., Parnaudeau, V., Houot, S., 2011. Near infrared reflectance spectroscopy: A tool to characterize the composition of different types of exogenous organic matter and their behaviour in soil. *Soil Biol. Biochem.* 43, 197–205. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.036>
- Reibel, A., Leclerc, B., 2018. Valorisation agricole des digestats : Quels impacts sur les cultures, le sol et l'environnement ? .
- Robin Beghin, 2020. Etude des conséquences de la digestion anaérobie du maïs sur ses caractéristiques amendantes: devenir des matières organiques, stockage du carbone, vie microbienne, capacité d'adsorption et stabilité structurale de l'horizon de surface de Luvisols cultivés. INPT, Toulouse.
- Sole-Mauri, F., Illa, J., Magrí, A., Prenafeta-Boldú, F.X., Flotats, X., 2007. An integrated biochemical and physical model for the composting process. *Bioresour. Technol.* 98, 3278–3293. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.07.012>
- Spérandio, M., 1998. Développement d'une procédure de compartimentation d'une eau résiduaire urbaine et application à la modélisation dynamique des procédés à boues activées. INSA Toulouse.
- Swift, R.S., 2018. Organic Matter Characterization. pp. 1011–1069. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c35>
- Triolo, J.M., Sommer, S.G., Møller, H.B., Weisbjerg, M.R., Jiang, X.Y., 2011. A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresour. Technol.* 102, 9395–9402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.026>
- Unifa, n.d. Le rôle des éléments nutritifs [WWW Document]. <https://fertilisation-edu.fr/nutrition-des->

Références Bibliographiques

plantes/le-rolé-des-éléments-nutritifs/azote.html.

- Van Soest, P.J., 1963. The Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds: II. A Rapid Method for the Determination of Fiber and Lignin. *Off. Agric. Chem.* 46, 829.
- Vavilin, V.A., Fernandez, B., Palatsi, J., Flotats, X., 2008. Hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic material: An overview. *Waste Manag.* 28, 939–951. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.028>
- Vavilin, V.A., Rytov, S.V., Lokshina, L.Y., 1996. A description of hydrolysis kinetics in anaerobic degradation of particulate organic matter. *Bioresour. Technol.* 56, 229–237. [https://doi.org/10.1016/0960-8524\(96\)00034-X](https://doi.org/10.1016/0960-8524(96)00034-X)
- Xie, T., Xie, S., Sivakumar, M., Nghiem, L.D., 2017. Relationship between the synergistic/antagonistic effect of anaerobic co-digestion and organic loading. *Int. Biodeterior. Biodegradation* 124, 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.03.025>
- Yasui, H., Sugimoto, M., Komatsu, K., Goel, R., Li, Y.Y., Noike, T., 2006. An approach for substrate mapping between ASM and ADM1 for sludge digestion. *Water Sci. Technol.* 54, 83–92. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.529>