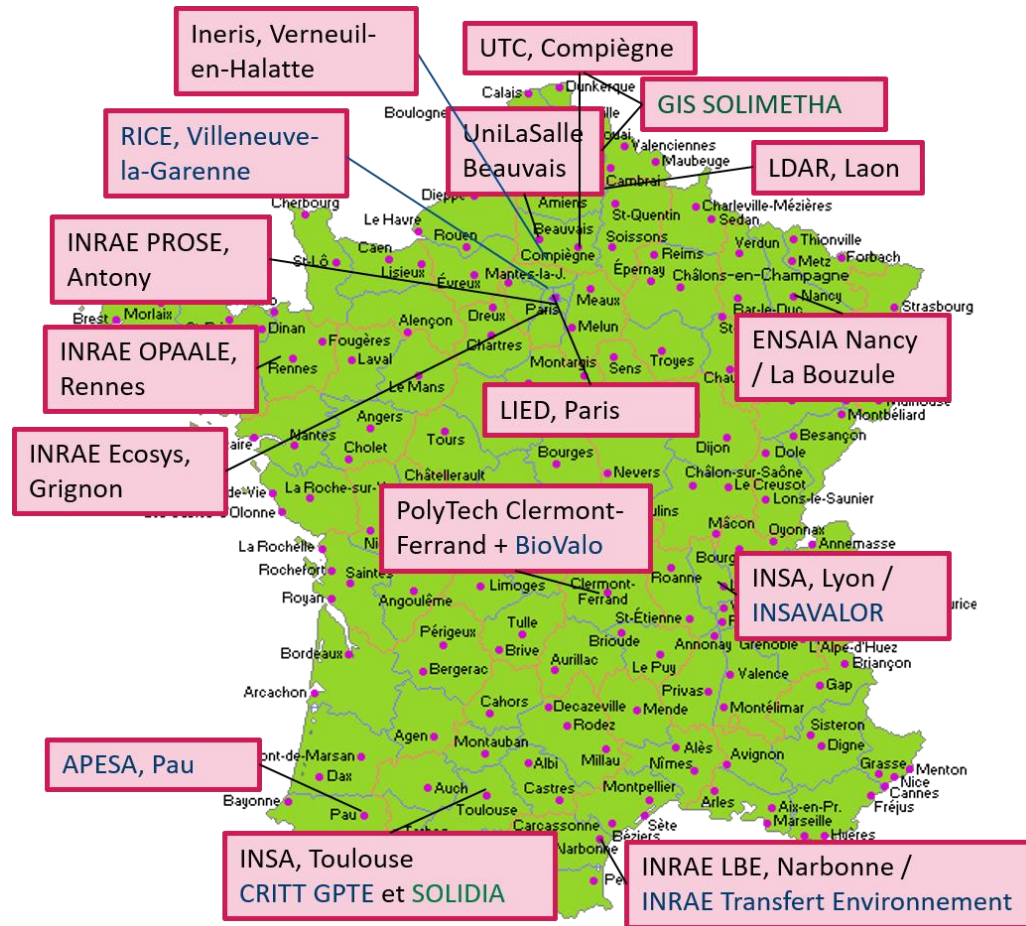


Les digestats issus de méthanisation de résidus organiques : effet de leur variabilité sur leur valorisation

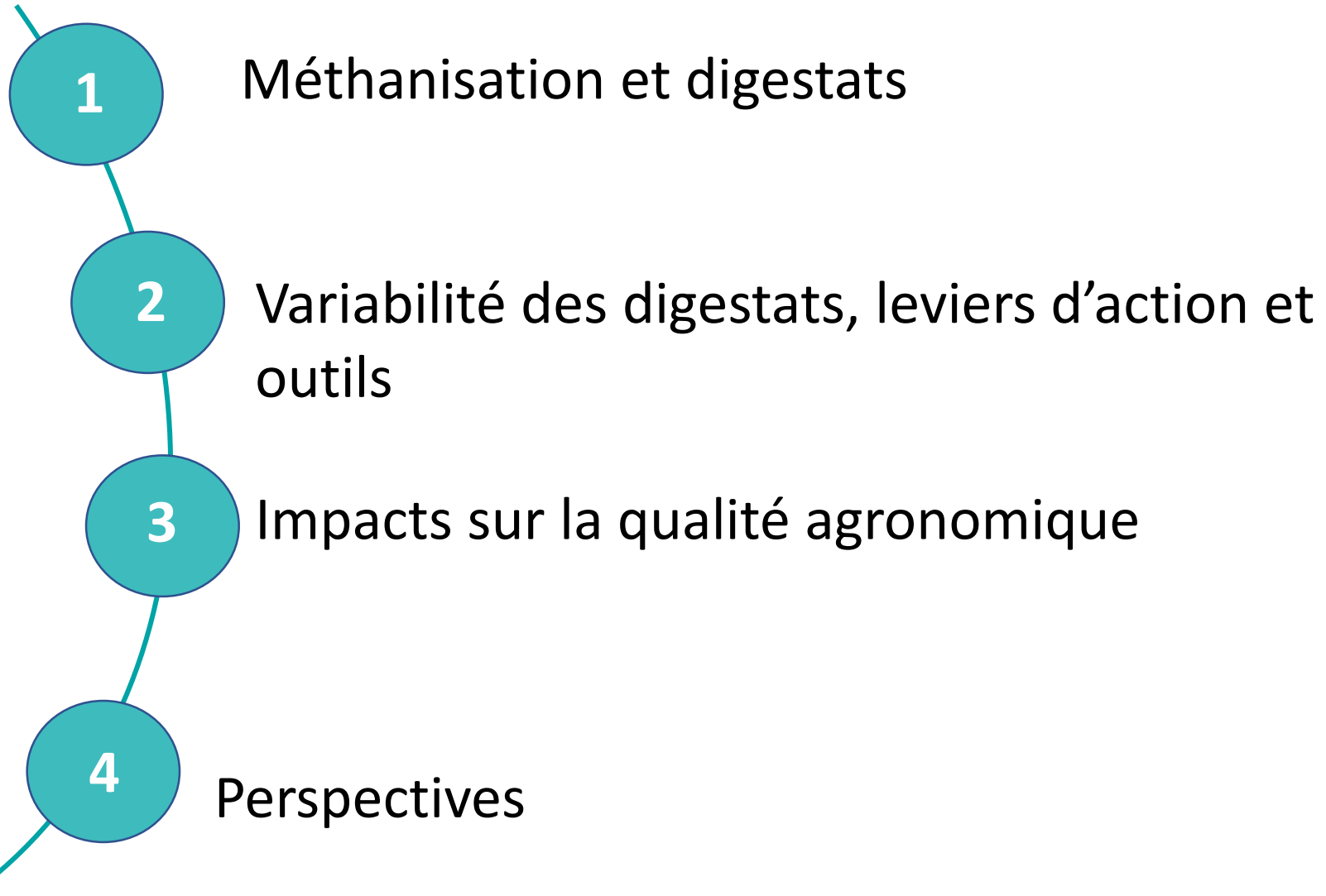
Julie JIMENEZ, Chargée de Recherche
INRAE, Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement
Narbonne

Centre Technique national du Biogaz et de la Méthanisation

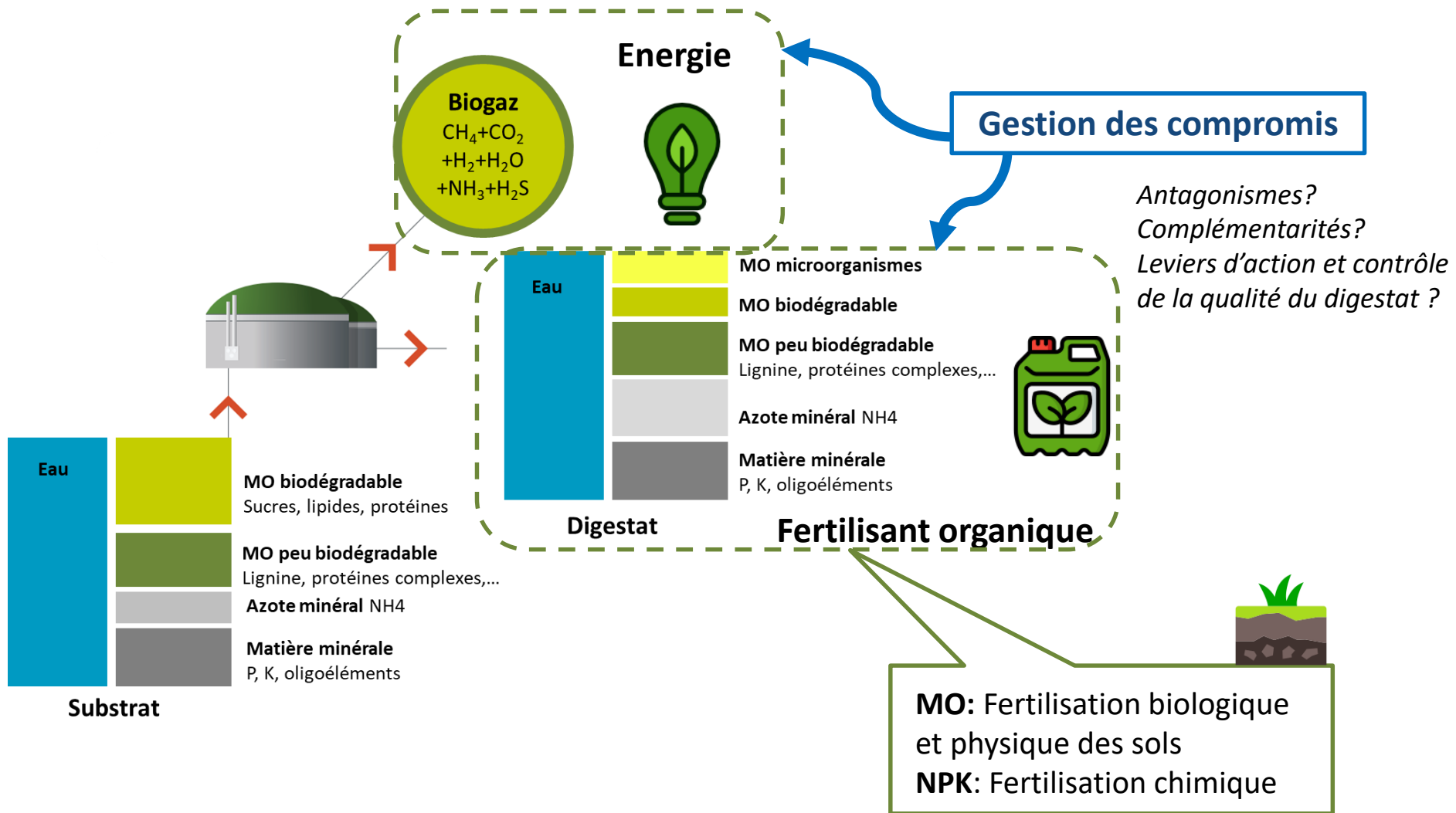


- Réseau des laboratoires
- Vecteur de diffusion des connaissances (InfoMétha.org et [webinaires](#))
- Co-organisateur des [Journées Recherche Innovation](#)
- GT : Valorisation du CO₂, Formations, Bouclage des cycles des nutriments
- Entité du Club Biogaz de l'ATEE, basée à La Défense
- Soutenu par l'ADEME depuis 2019

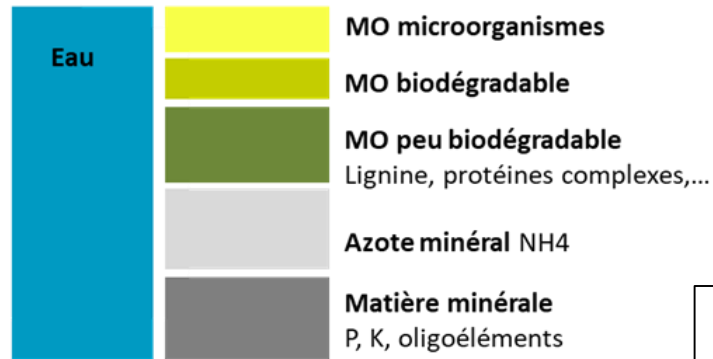
Déroulé de l'exposé



Contexte: la méthanisation des résidus organiques



Les digestats issus de méthanisation



Digestat

Adéquation?

**Contraintes
environnementales**

Emission GES
Lixiviations
Innocuité...

Tous les ingrédients sont là!

Quel état? Disponible ou non? Stable?
Toxicité? Effet environnement?
?????

Besoins agrosystèmes

Fertilité biologique

court terme: MO fermentescible, labile
Amélioration biodiversité et promouvoir activité biologique



Fertilité chimique

court-moyen terme: nutriments (N, P, K, S)
Nutrition plantes



Fertilité physique

long terme: MO stable, Stockage C
Améliorer structure sol, capacité rétention d'eau, stockage



Le challenge des digestats et variabilité

- Produit majoritaire (en masse) issu de la digestion anaérobie (DA)
- Mélange de biomasse microbienne, minéraux et matière organique non digérée



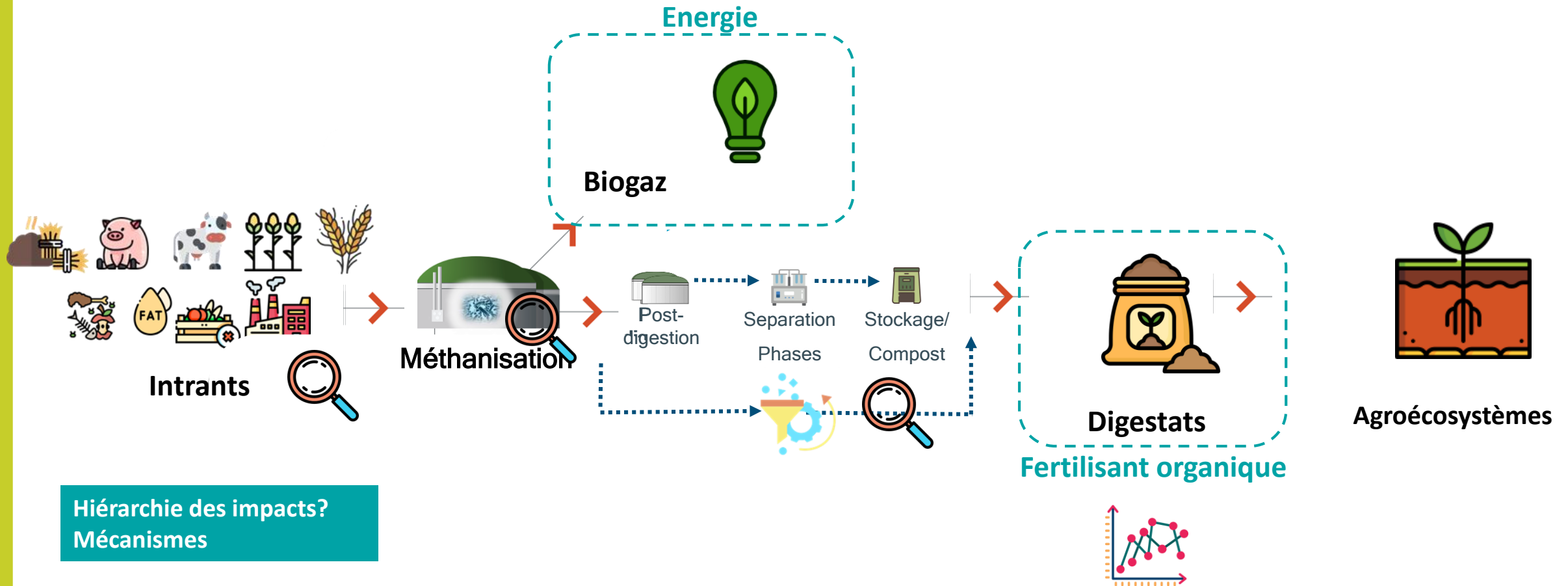
Opportunité!



Hypothèse: impact sur la qualité agronomique des produits

Identifier les leviers d'action afin de contrôler la qualité agronomique

Identification des sources de variabilité

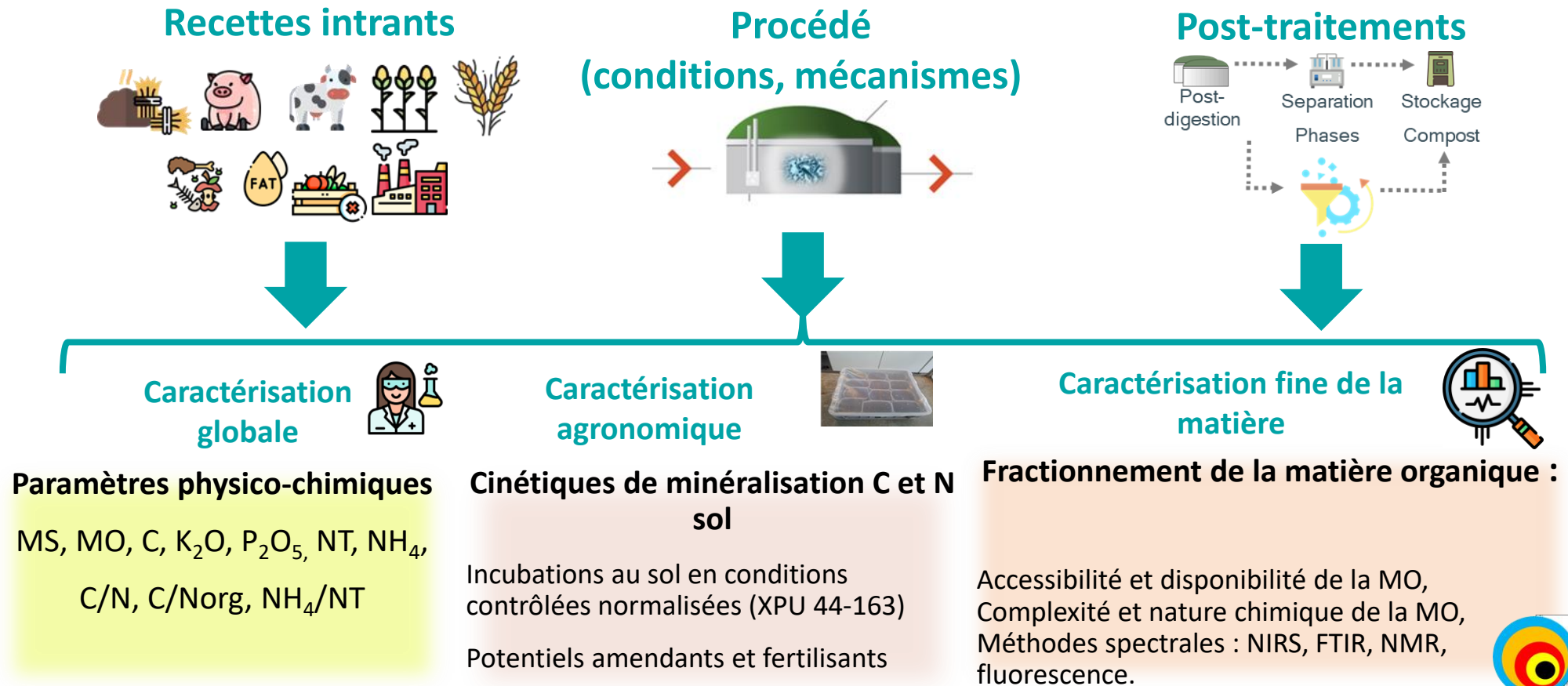


Hiérarchie des impacts?
Mécanismes

Moyen de répondre à ces questions:
indicateurs de caractérisation

Comment décrire la variabilité des digestats?

Effets sur la qualité des digestats: base de données caractérisation

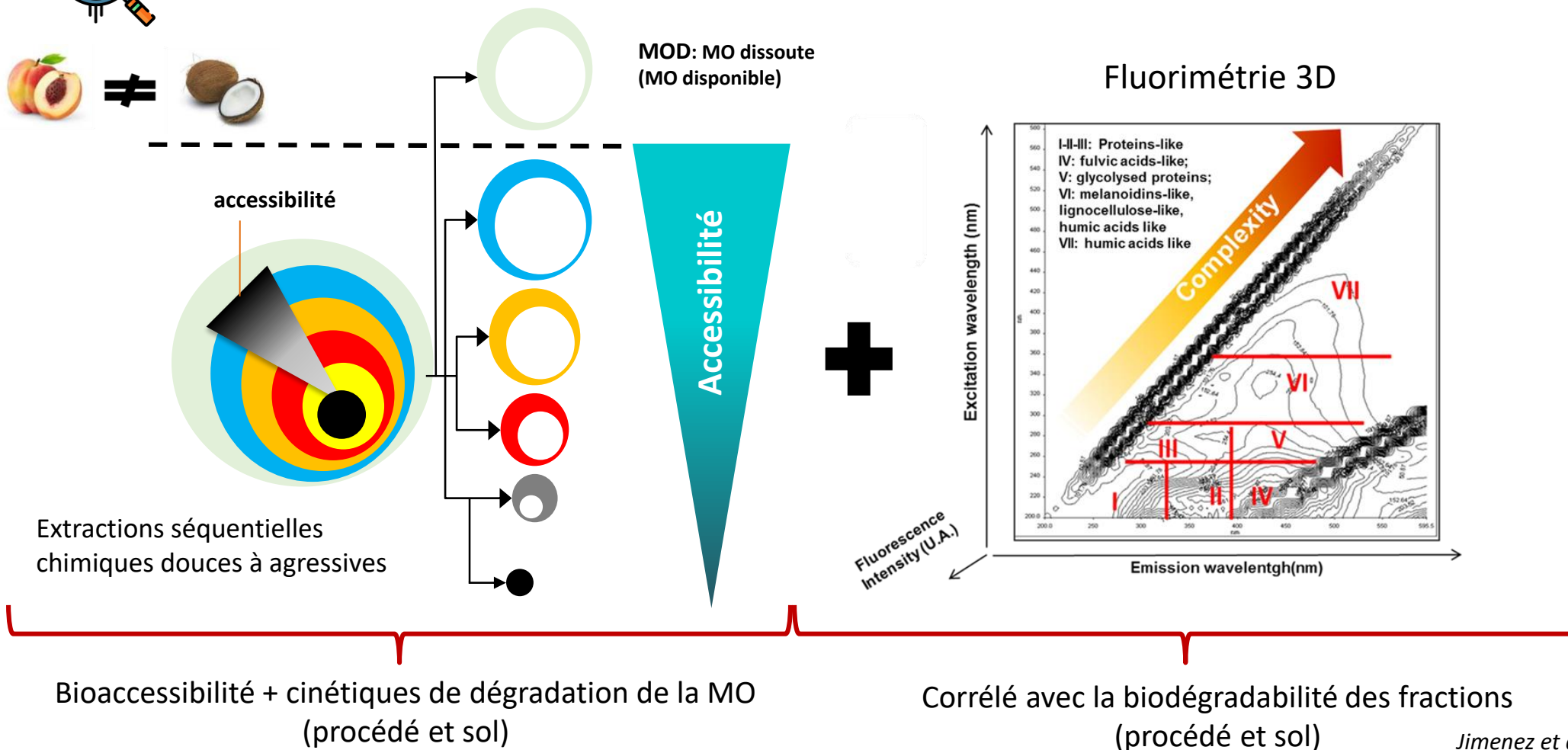


Description de la variabilité des digestats

Caractérisation de la qualité fine de la matière organique



• IsBaMo®: (Indice Stabilité et Bioaccessibilité MO)



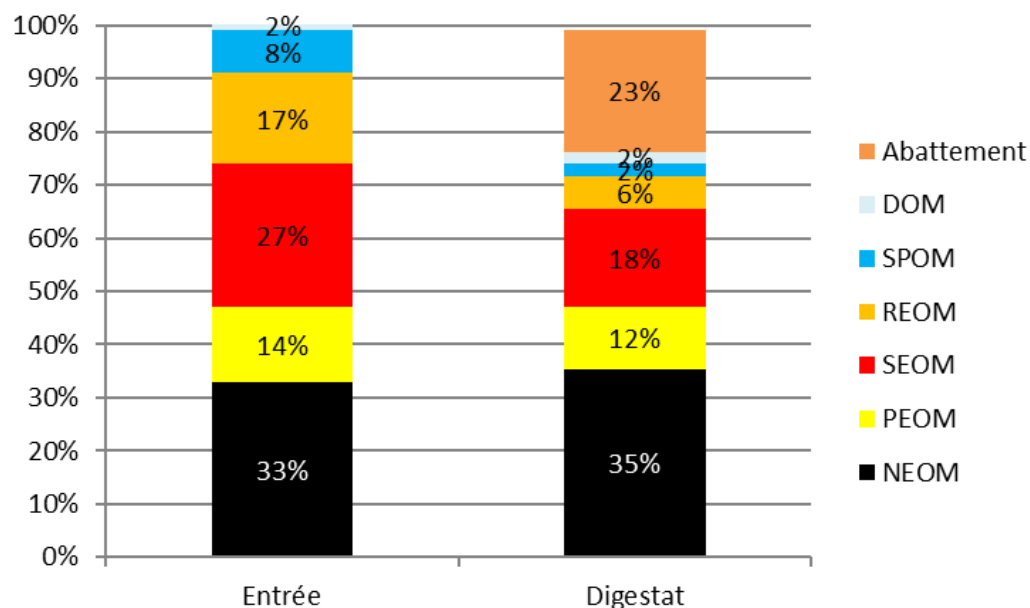
Description de la variabilité des digestats

Caractérisation de la qualité fine de la matière organique

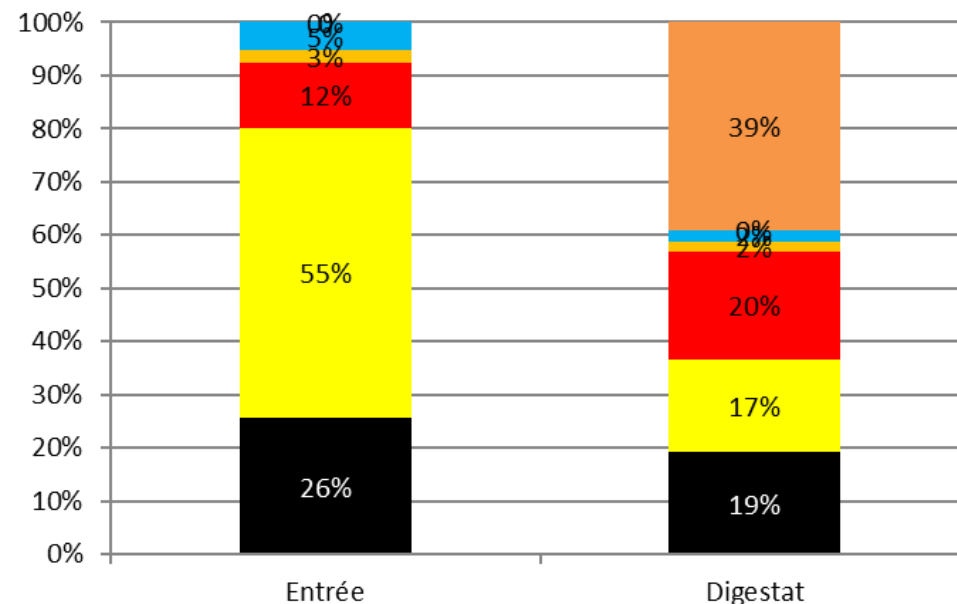


• IsBaMo[®]: (Indice Stabilité et Bioaccessibilité MO)

Boues Station épuration
continue, humide, mésophile



Fumier bovin,
voie sèche, batch, mésophile

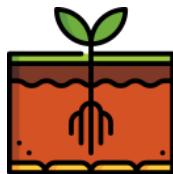
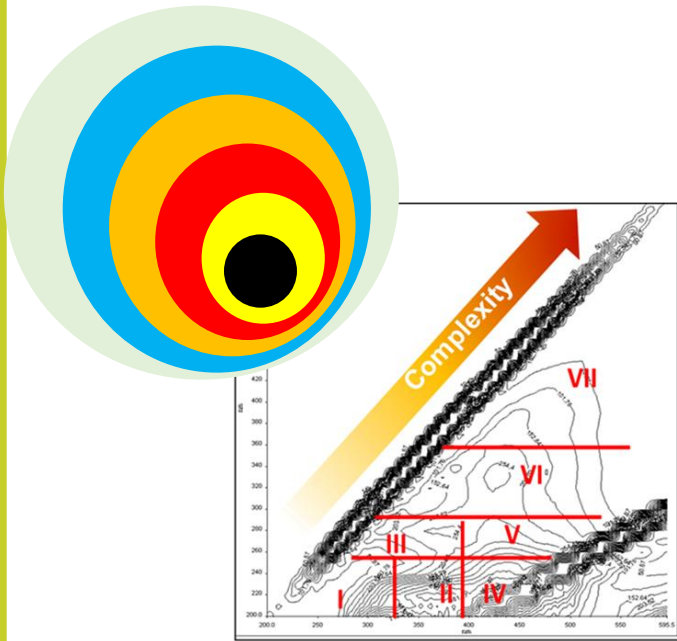


Qualité MO intrants variable -> impact sur production méthane et qualité MO résiduelle

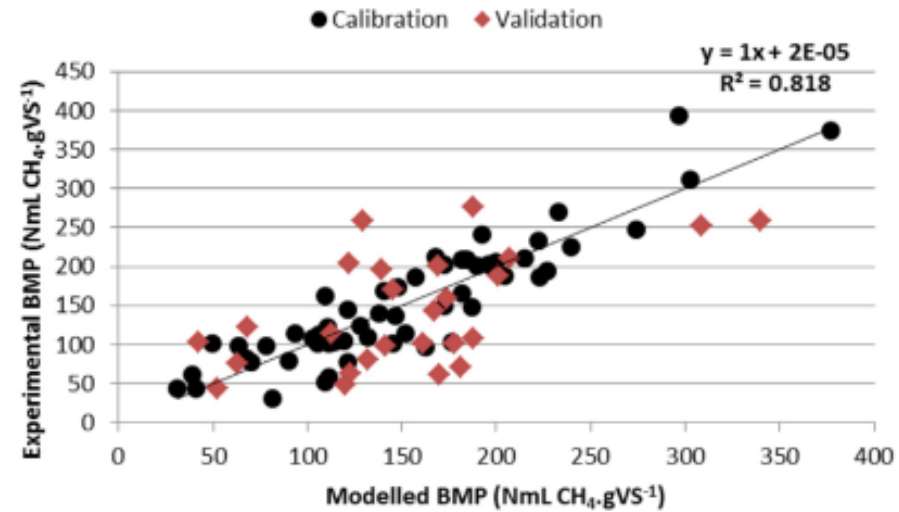
Description de la variabilité des digestats



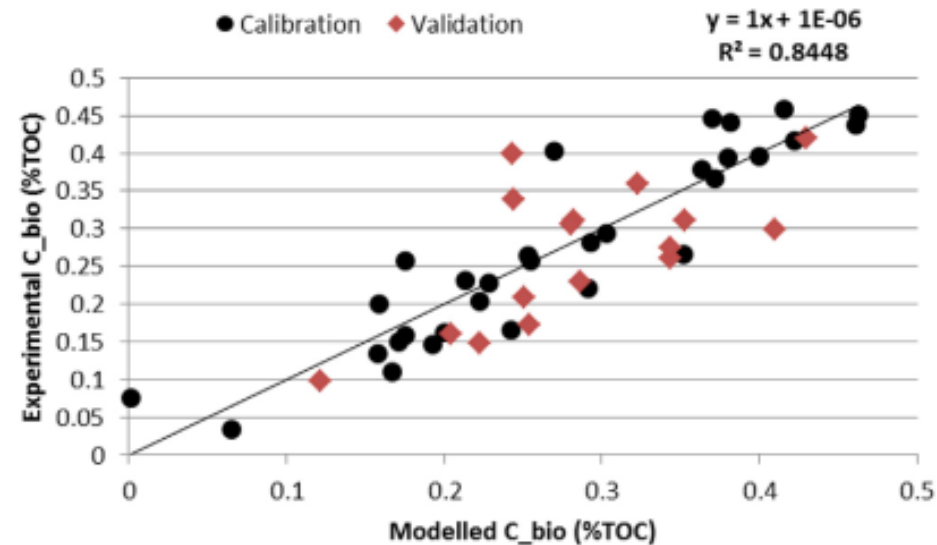
- IsBaMo[®]



Potentiel méthane



C minéralisable sol



Description de la variabilité des digestats

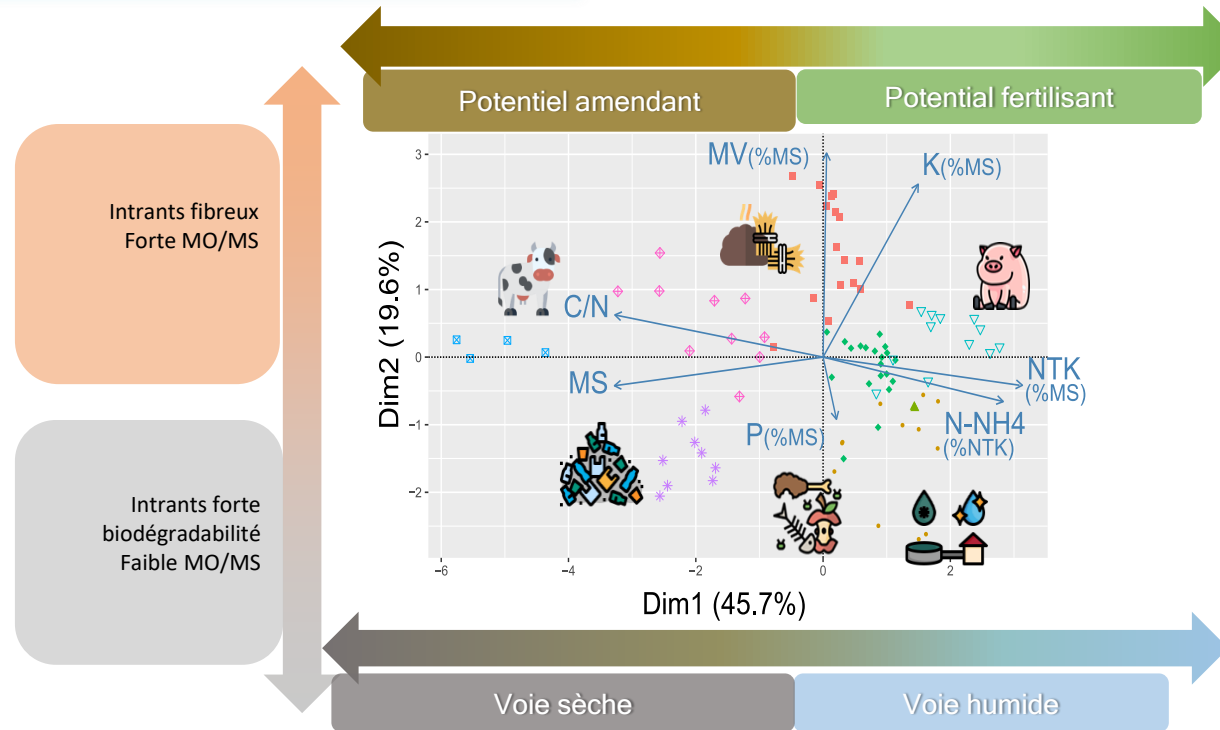
Variabilité des intrants et impact sur la qualité agronomique globale



Paramètres physico-chimiques

MS, MO, C, K_2O , P_2O_5 , NT, NH_4 , C/N

Données littératures + internes : 150 digestats urbains + agricoles



« Empreinte » nature intrants sur qualité digestats

Description de la variabilité des digestats

Variabilité des intrants et impact sur la qualité agronomique globale



Paramètres physico-chimiques

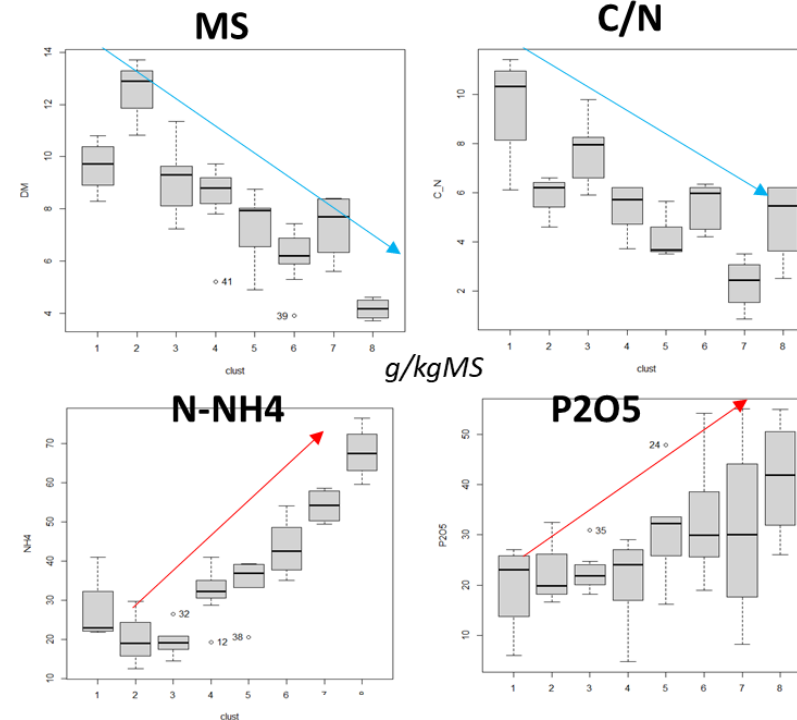
MS, MO, C, K₂O, P₂O₅, NT, NH₄, C/N

Données sites agricoles:

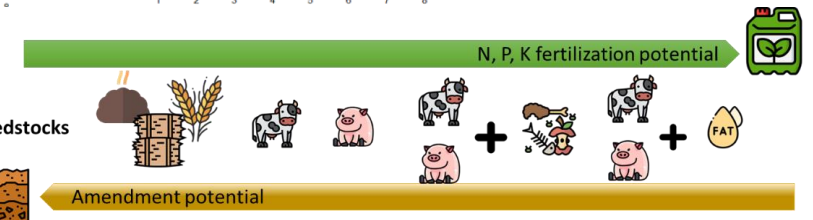
72 sites (AAMF)

Digestats bruts (voie liquide)

Cluster	Intrants
1	Fumiers + Végétaux
2	Fumiers + Végétaux + Lisier Ruminant
3	Fumiers
4	Lisier Ruminant
5	Lisier Non Ruminant + Biodéchets
6	Lisier Non Ruminant
7	Lisier Ruminant + Graisses
8	Lisier Non Ruminant + Graisses



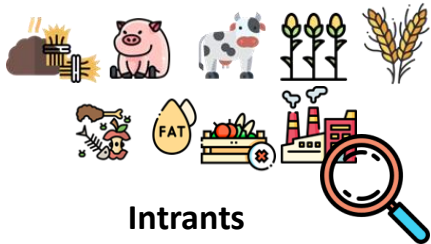
Projet Concept-Dig (ADEME, 2019)



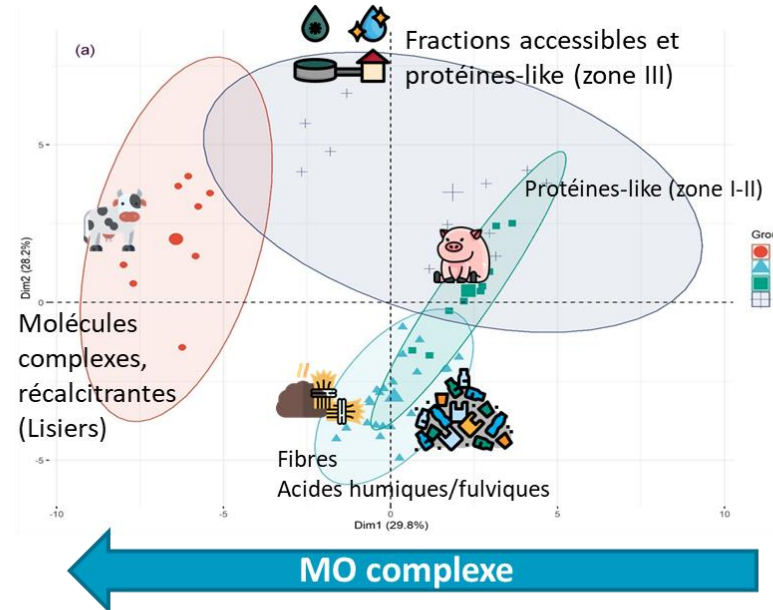
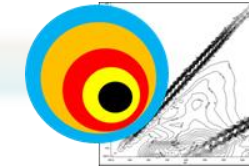
« Empreinte » nature intrants sur qualité digestats

Description de la variabilité des digestats

Variabilité des intrants et impact sur la qualité fine de la matière organique



56 échantillons (26 Intrants/Digestats)



Conditions procédé?

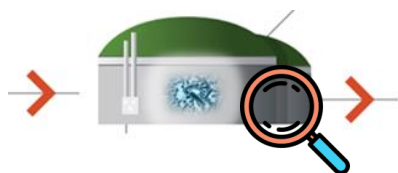
Groupes:

- (A) Lisiers en co-digestions avec boues primaires, IAA/biodéchets
- (B) Substrats fibreux: fumier/FFOM
- (C) Lisier de porc en co-digestion
- (D) Boues secondaires STEP

Empreinte qualité MO intrants sur qualité MO digestats

Description de la variabilité des digestats

Variabilité conditions opératoires



- Méthanisation voie sèche vs voie liquide
 - Impact sur la MS mais corrélé avec typologie intrants
Guilayn et al., 2018; Concept-Dig, 2019
- Conditions T°C et Temps de séjour hydraulique
 - Corrélation avec MO et qualité MO plus complexe (fluorimétrie)
 - Impact non significatif
 - Corrélés avec typologie intrants!



Concept-Dig, 2019; Fernandez-Dominguez et al., 2021

Exemples:

Boues: voie humide, mésophile, TSH = 20-30 jours

Fumier bovin: voie sèche, mésophile, TSH > 100 jours

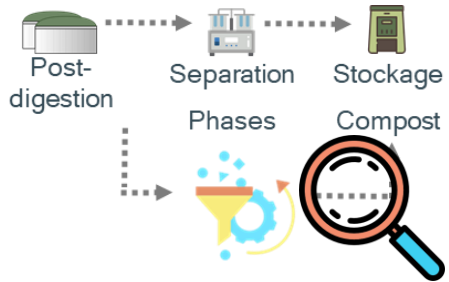
FFOM : voie sèche, thermophile, TSH = 25-35 jours

Projet Concept-Dig (ADEME, 2019)

Besoin de décorréler le type d'intrants avec les conditions associées

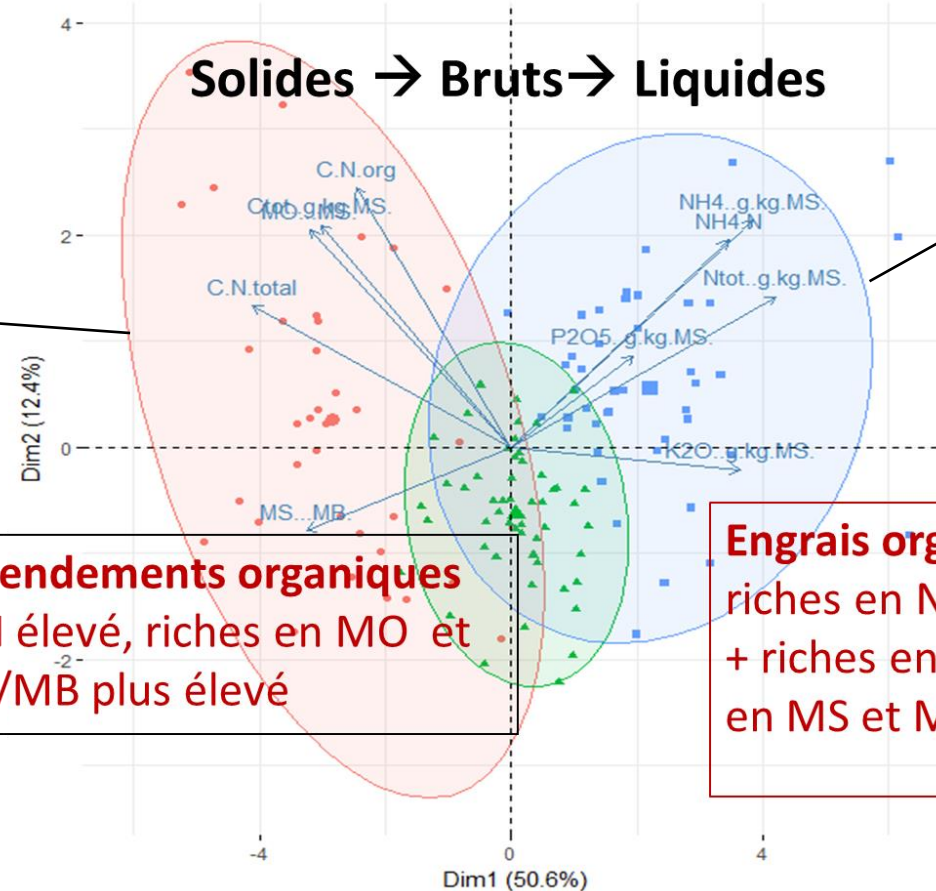
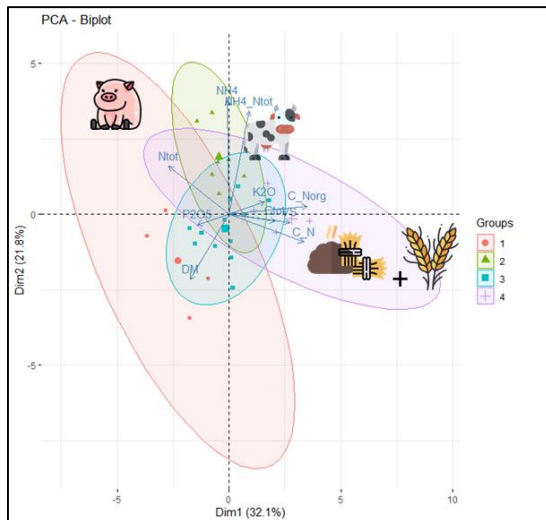
Description de la variabilité des digestats

Variabilité des post-traitements



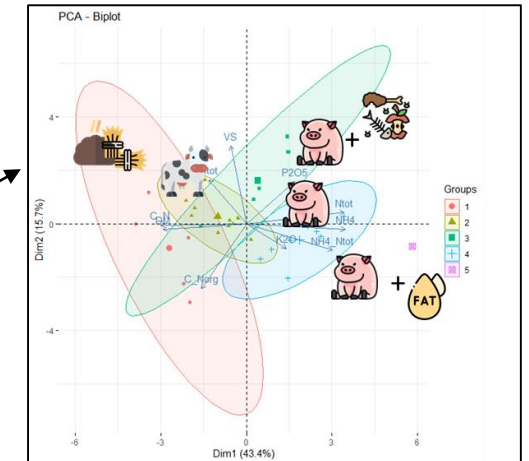
Séparation de phases: 2 produits potentiel amendant vs fertilisant et empreinte intrants

Guilayn et al. (2019 a et b); Concept-Dig (ADEME, 2019)



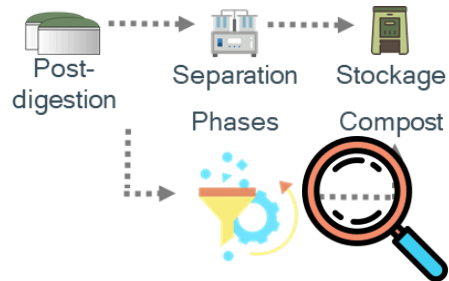
Amendements organiques
C/N élevé, riches en MO et MS/MB plus élevé

Engrais organiques
riches en NH_4 , K_2O ,
+ riches en N et plus pauvre en MS et MO



Description de la variabilité des digestats

Variabilité des post-traitements



Séparation de phases: 2 produits potentiel amendant vs fertilisant et empreinte intrants

Guilayn et al. (2019 b); Concept-Dig (ADEME, 2019)

Efficacité séparation

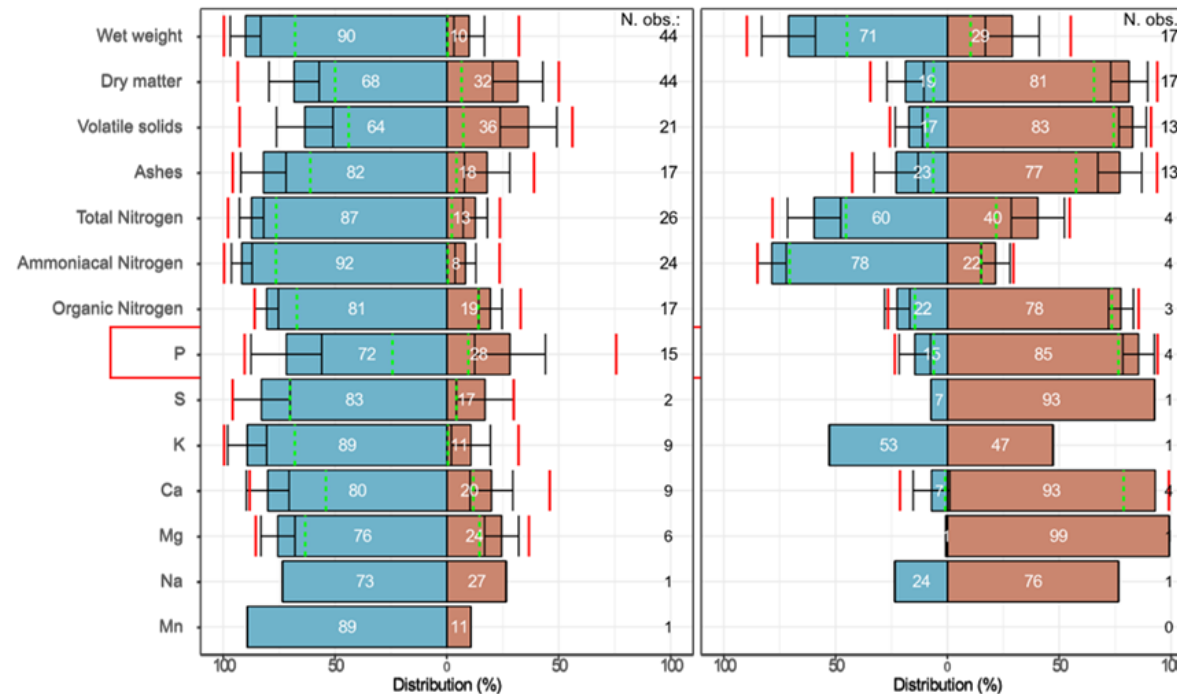
Presse-à-vis



Centrifugation



Liquid fraction
 Solid fraction
 Min. Max.
 Mean $\pm$ std. dev.



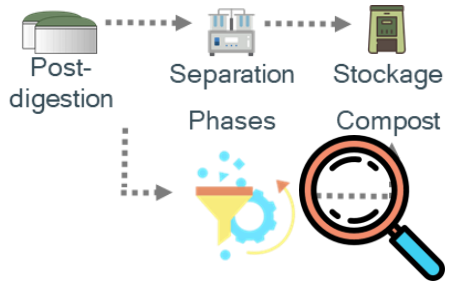
Indicateurs d'efficacité et calculs bilans matières dans l'article

Guilayn et al. 2019 (b)

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.11.090>

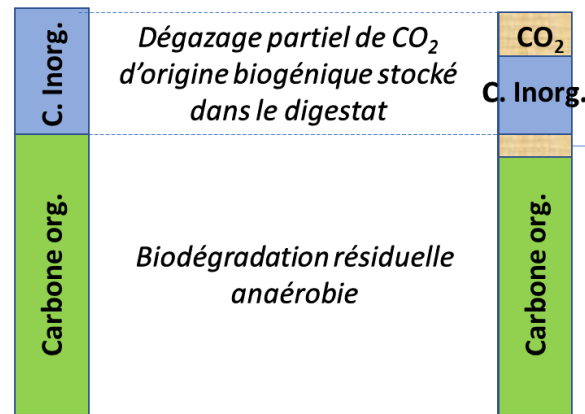
Description de la variabilité des digestats

Variabilité des post-traitements



Stockage et compostage : effets C et N

Carbone/matière organique



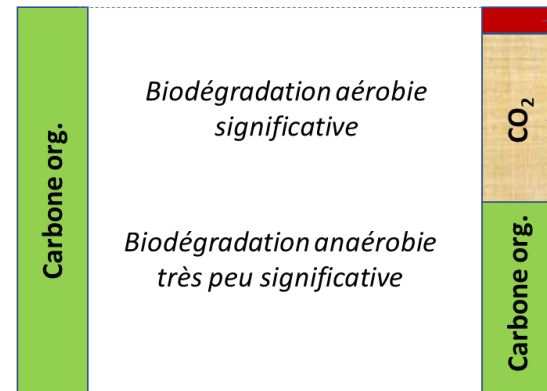
Mélange CH₄/CO₂

5-6% C_{org} pour les digestats bruts

6-10% C_{org} pour les phases liquides

Digestat Brut/phase liquide

Digestat Brut/phase liquide stocké (>1,5 mois)



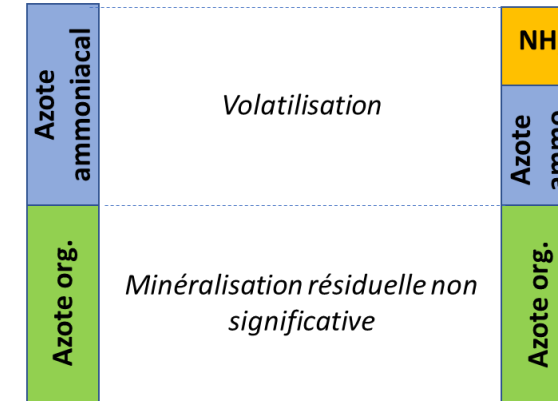
CH₄ → < 1% C_{org}

CO₂ → 24 - 40% C_{org}

Phase solide

Phase solide stockée (>3 mois)

Azote



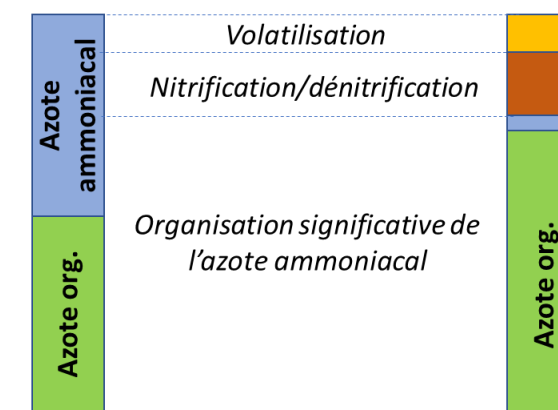
Potentiel de volatilisation moyens
Digestats bruts : 17% N_{tot}
Phases liquides : 28% N_{tot}

Emissions dépendantes des conditions de stockage :

- Couverture : - 80% d'émission
- Croûte : jusqu'à - 30-40% d'émission

Digestat Brut/phase liquide

Digestat Brut/phase liquide stocké (1,5 mois)



NH₃ => 1-5% N_{tot}

NO₃⁻, N₂, N₂O
(proportions variable d'un digestat à un autre) (2-15% N_{tot})

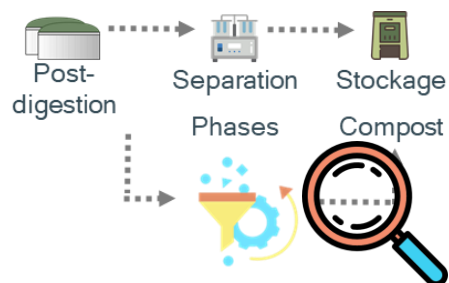
Azote ammoniacal résiduel 1-9% N_{tot}

Conditions contrôlées laboratoire

OPAALE INRAE

Description de la variabilité des digestats

Variabilité des post-traitements



Stockage et compostage : effets C et N

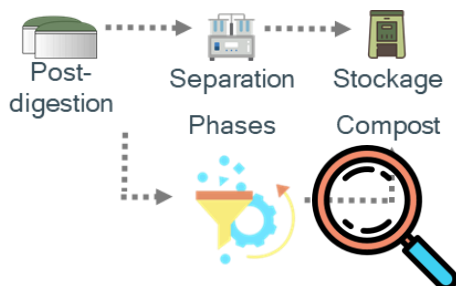
	Stockage	Compostage
Résultats	Impact qualité digestats (C et N) Conditions stockage: émissions NH_3 Stockage solide proche compostage -> Prédiction qualité globale	Impact qualité (C, MO et N) Impact sur qualité agronomique (<i>vers potentiel amendant</i>)
Références	Maynaud et al., 2017 Concept-Dig (Ademe, 2019) Bareha et al. (2021)	Maynaud et al., 2017 Concept-Dig (Ademe, 2019) Bareha et al. (2021)

Projet CRUST (GRDF, en cours) sur l'évaluation des émissions au cours du stockage des digestats

Description de la variabilité des digestats



Variabilité des post-traitements



➤ Post-traitement innovant

✓ Thèse Felipe Guilayn (2016-2019)

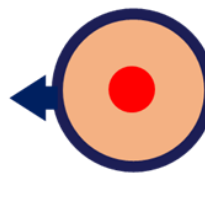


Conservation

Objectif Un produit → **agriculture**

Procédé

1. Conservation NH_4^+ : **Acidification**
2. Réduction masse: **Séchage**



Fractionnement

Plusieurs produits → **agriculture** and **au-delà**

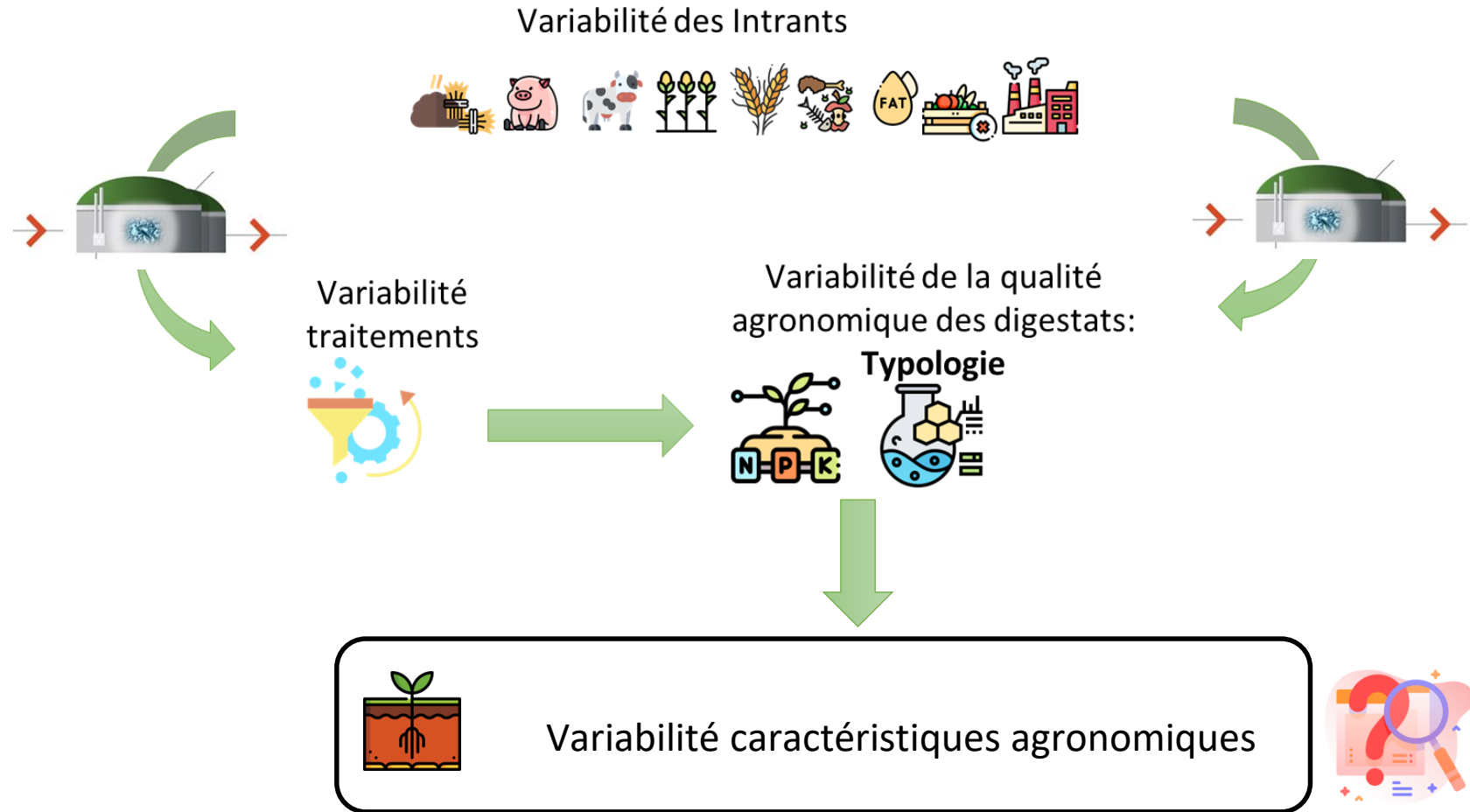
1. Alcalinisation pour:
 - Extraction des **substances humiques-like**
2. Séparation de phases
 - Liquide: Potentiel biostimulant
 - Solide: Amendement organique



Preuve de concept -> Montée en échelle

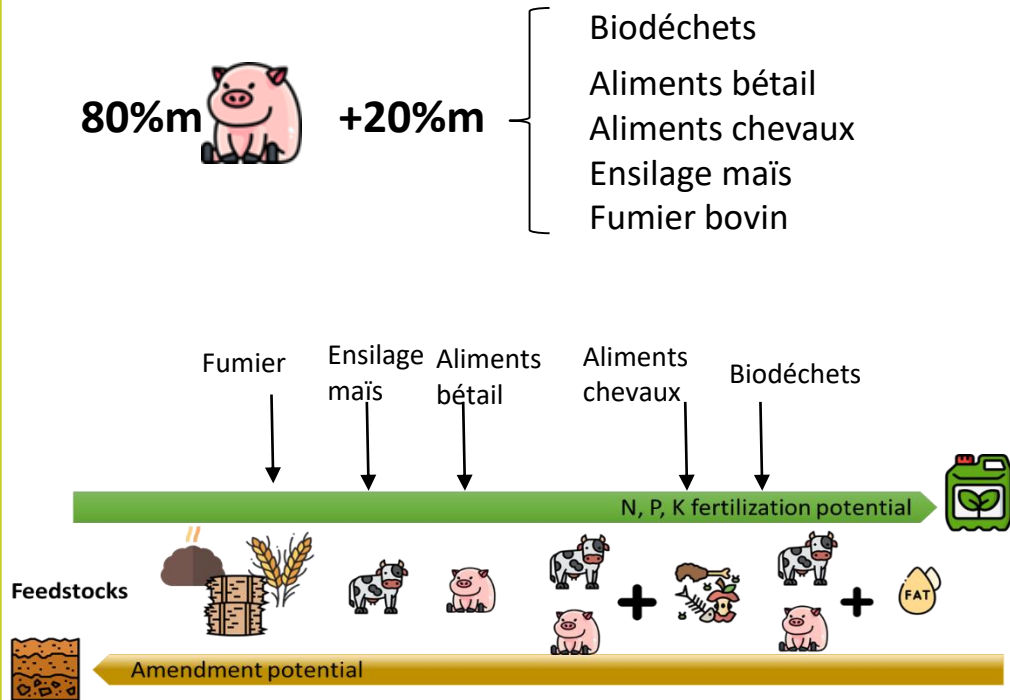
Guilayn et al. (2020 a and b)
Biogaz-Rio (FEDER, 2022)

Description de la variabilité des digestats

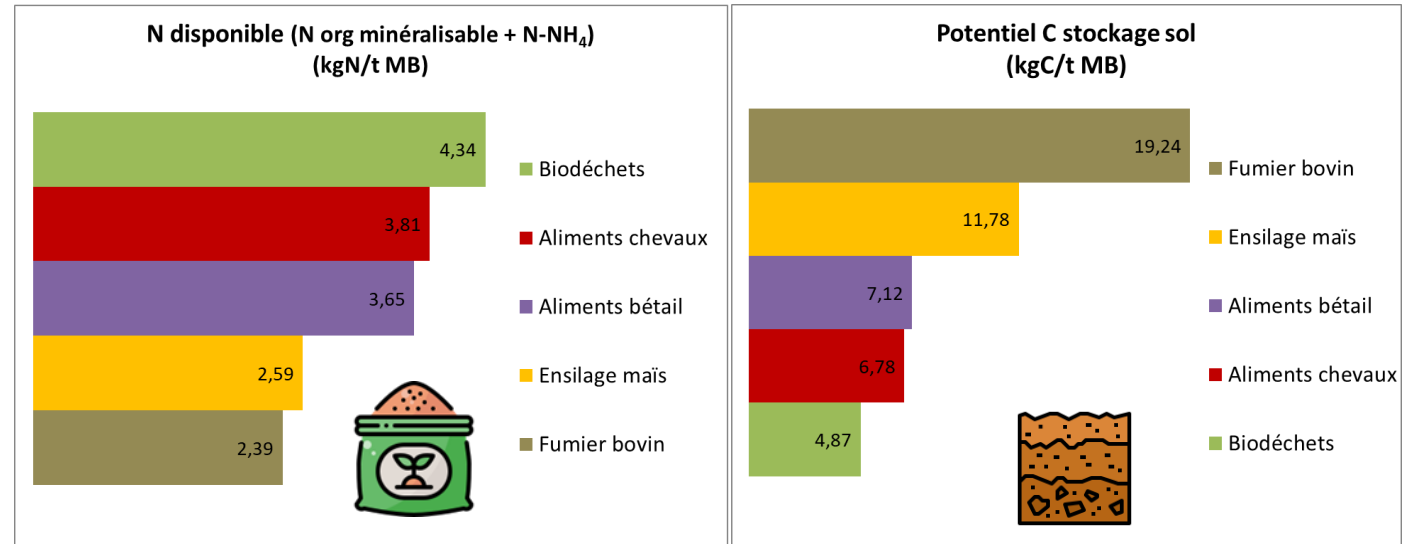


Description de la variabilité des digestats

Variabilité des intrants et impacts sur le potentiel amendant et fertilisant N



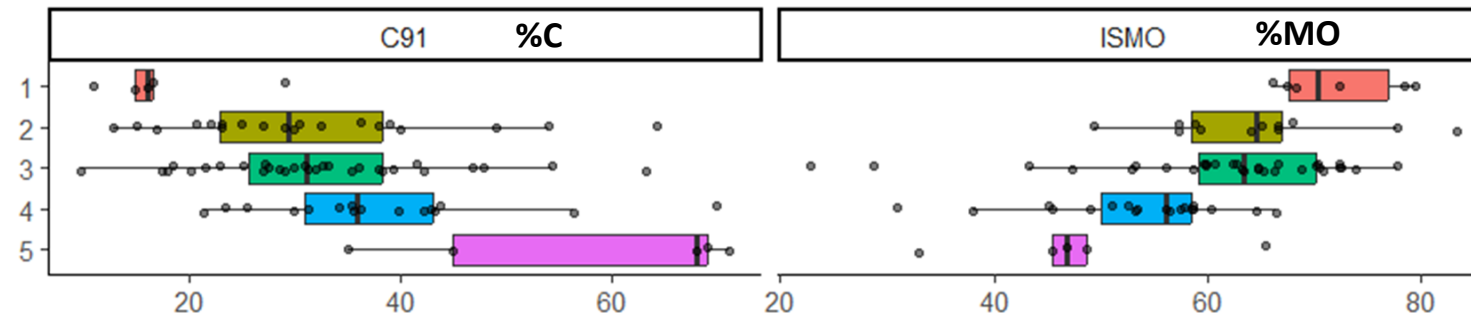
Caractérisation agronomique



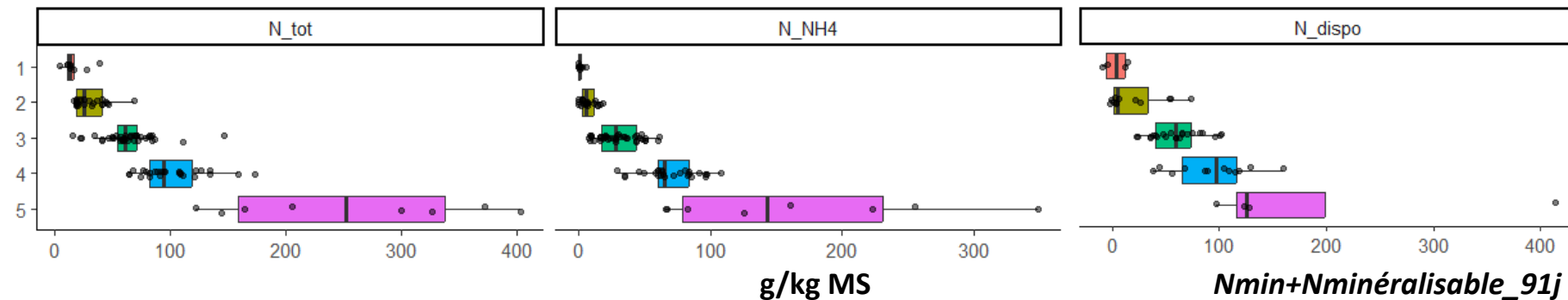
Description de la variabilité des digestats

Variabilité des intrants et post-traitements sur la caractérisation agronomique

Données C minéralisable au sol et N disponibles

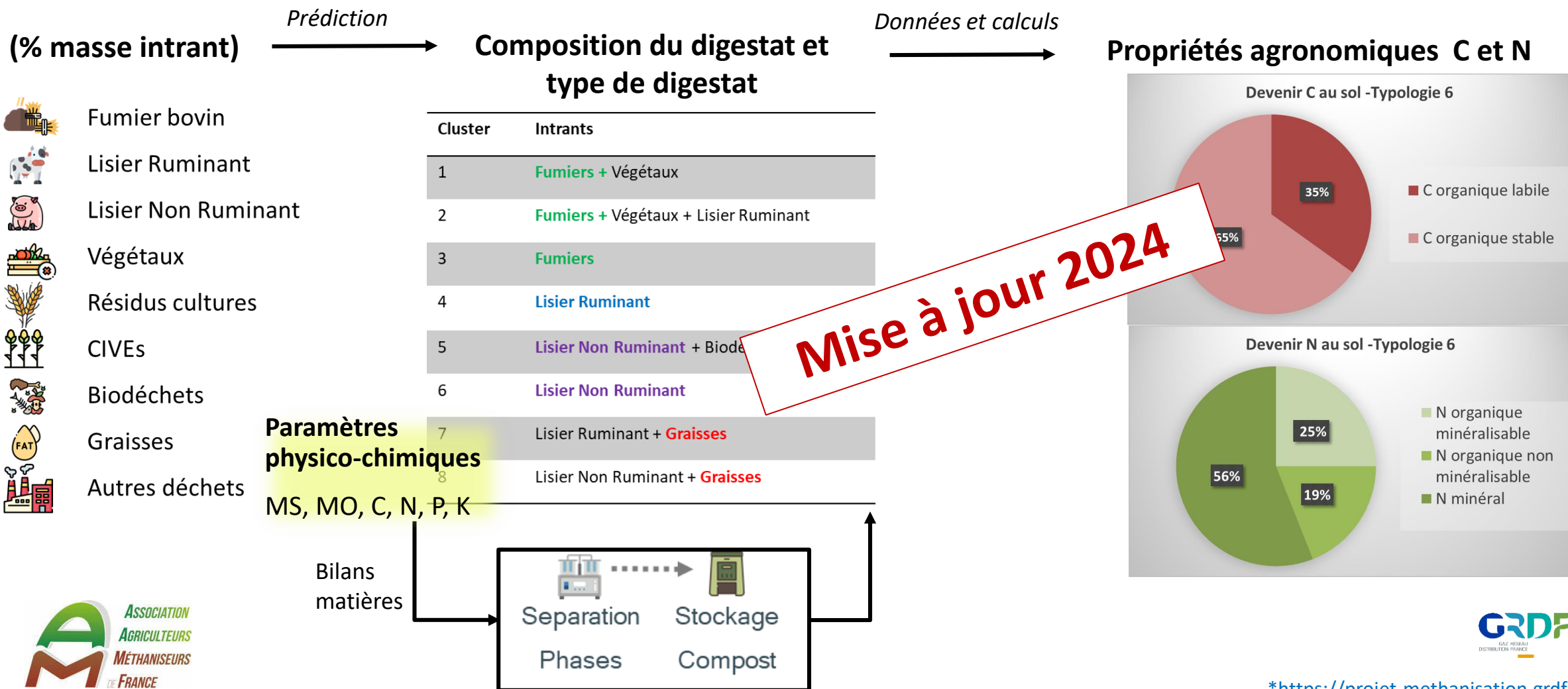


Azote total, azote minéral et minéralisation



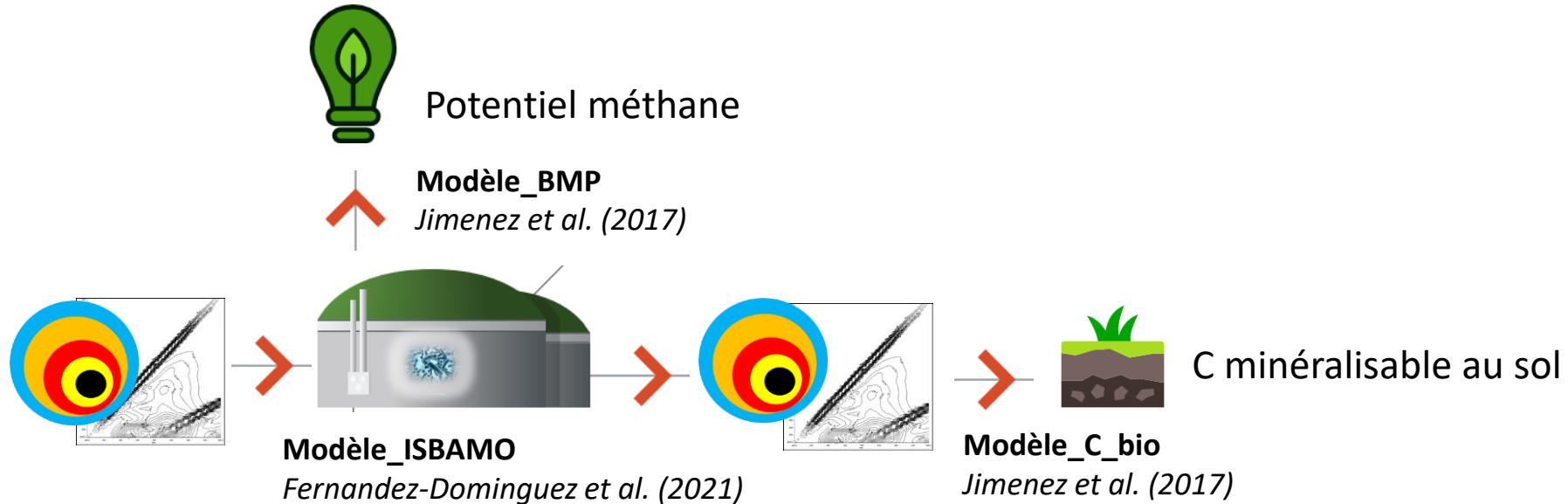
Outil Concept-Dig

Outil de prédiction de la composition des digestats : logiciel en ligne*



Outil prédiction filière IsBaMO

Outil de prédiction de la composition des digestats



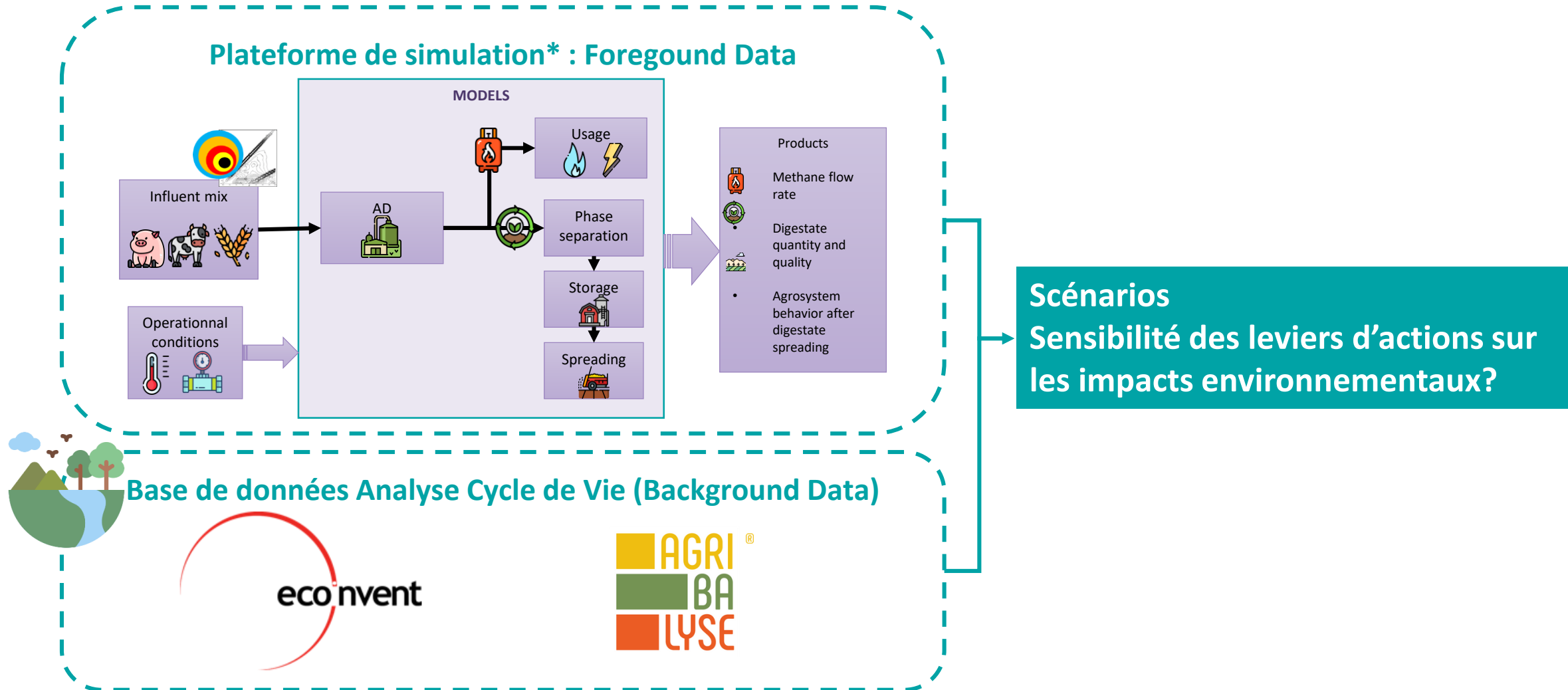
Antagonismes/Synergies...

	Accessibilité (% in COD)					Fluorescence complexity index (-)			
	DOM+ SPOM	REOM	SEOM	PEOM	NEOM	SPOM	REOM	SEOM	PEOM
C_bio_sol	+	+	+	++	---	--	--	+	0
BMP	+++	0	--	+	0	---	--	--	0

Contrôler les caractéristiques des digestats pour améliorer leur retour au sol!

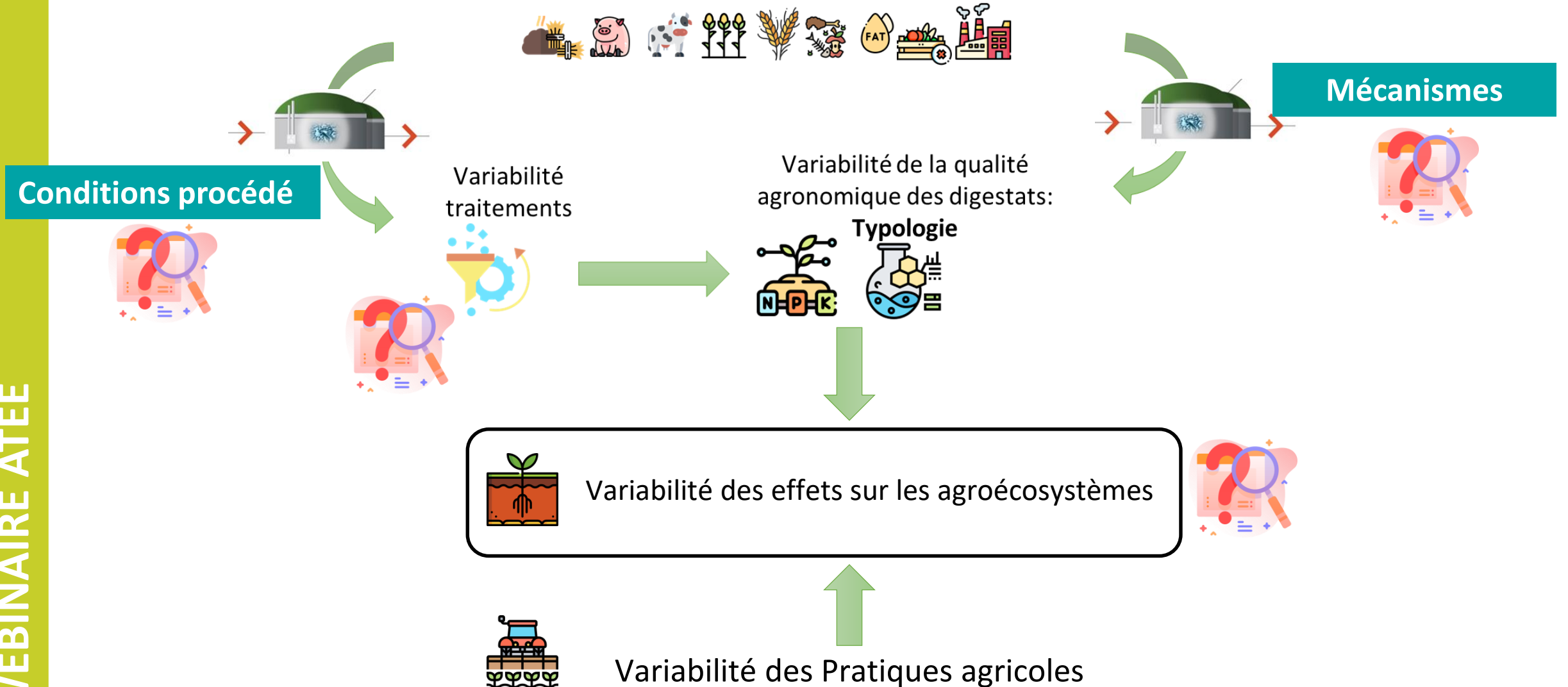
Plateforme modélisation filière pour son optimisation

Thèse Margaud Pérémé (2020-2023)

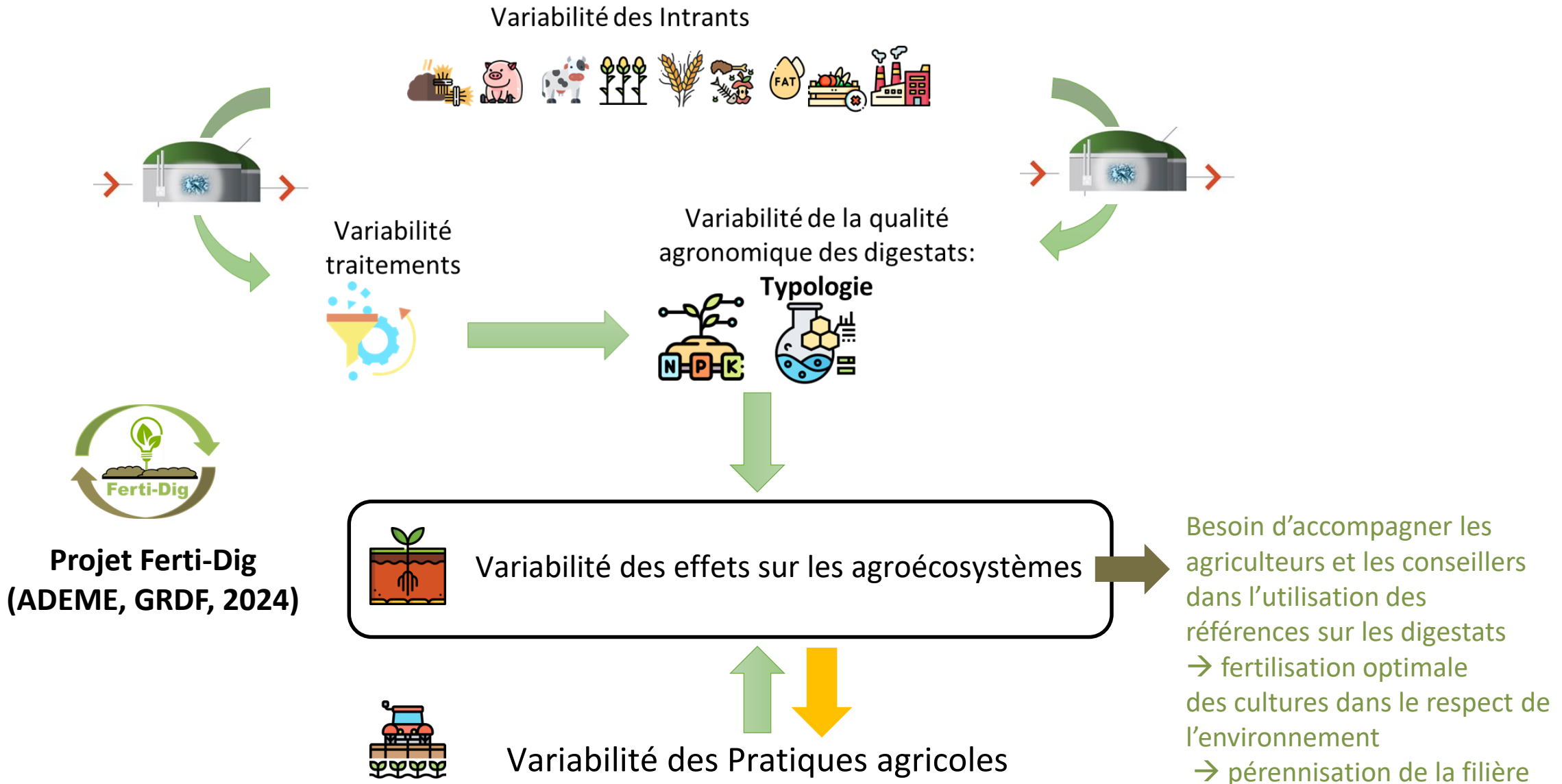


*Modèles mécanistiques pour méthanisation et devenir au sol (Pérémé et al., 2023)

Bilan et perspectives



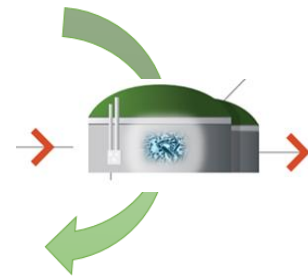
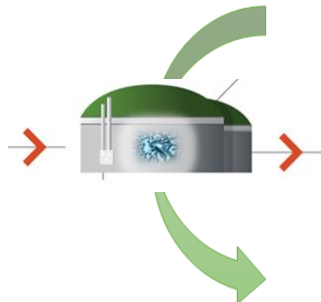
Bilan et perspectives



Projet Ferti-Dig



Variabilité des Intrants



Variabilité
traitements

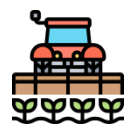


Variabilité de la qualité
agronomique des digestats:

Typologie



Variabilité des effets sur les agroécosystèmes

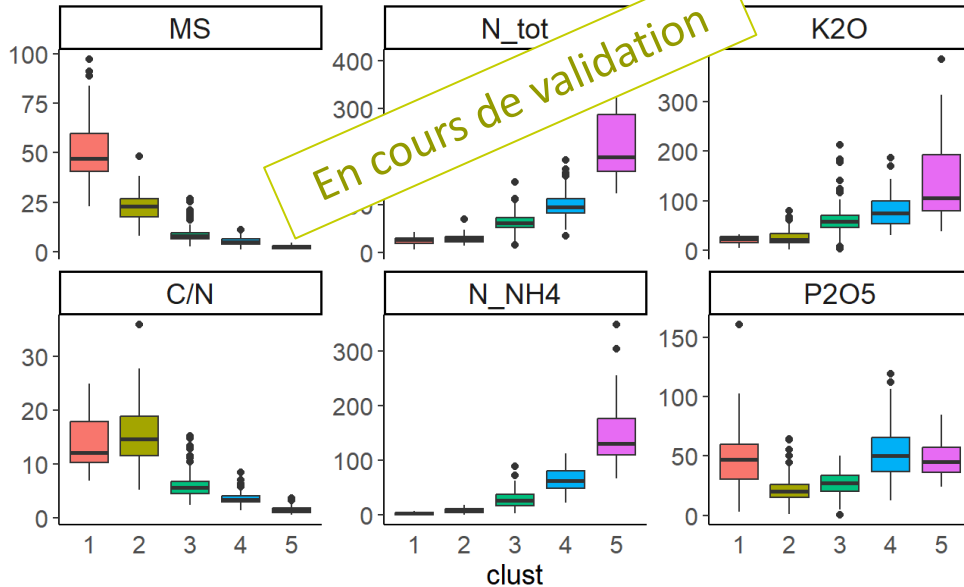


Variabilité des Pratiques agricoles

Guide des bonnes pratiques
d'utilisation par type de digestats
site web (2024)



Projet Ferti-Dig



Lien entre Typologie
et variables « effets »



Variables caractéristiques agronomiques:

ISMO, Cmin, Nmin, ETM, CTO



Variables « Effets » (BDD en cours)

Fertilité chimique : KeqN, rendement, volatilisation NH_3

Fertilité bio : vers de terre + données MethaBioSol

Fertilité physique : indicateurs stabilité structurale

clust 1 2 3 4 5

Brut/
liquide

Solide/
compost

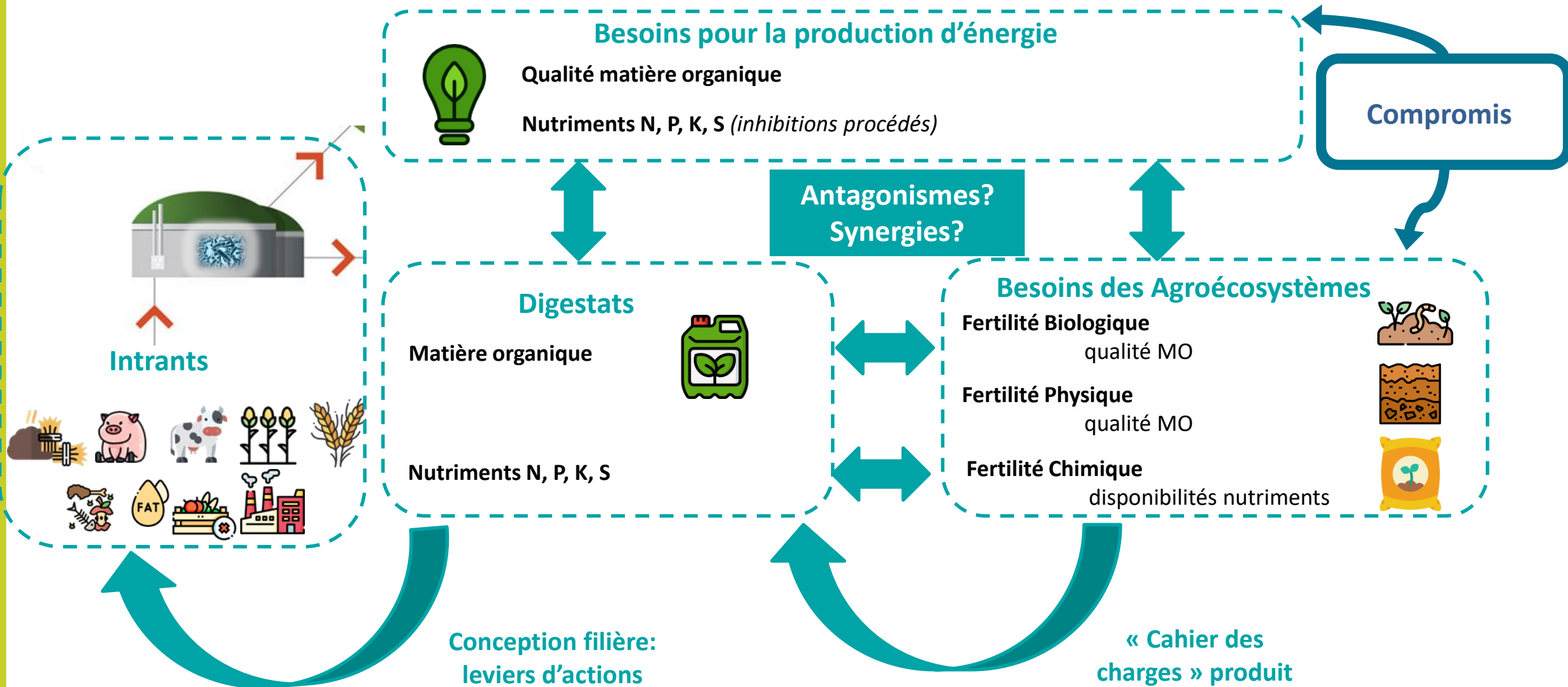


677 digestats recensés
+
208 réf littérature



Fiches Type de digestats
(Intrants / Séparation phases / Condit° méthanisation)

Optimisation de la filière méthanisation....



Merci de votre attention

Références

- 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, Younès; Affès, Rim; Buffet, Julie; Girault, Romain, 2021, "SYS-Metha : Outil de prédiction des flux d'azote et de carbone sur les filières de méthanisation et des propriétés des digestats.", <https://doi.org/10.15454/U4S6OF>
- 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, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2021.10.004>, <https://hal.inrae.fr/hal-03473235>
- 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, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.004>, <https://hal.inrae.fr/hal-02627274>
- Felipe Guilayn, Mohamed Benbrahim, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau, Julie Jimenez (2020a). Humic-like substances extracted from different digestates: First trials of lettuce biostimulation in hydroponic culture. *Waste Management*, 104 239-245, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.01.025>, <https://hal.inrae.fr/hal-02627274>
- Felipe Guilayn, M. Rouez, M. Crest, Dominique Patureau, Julie Jimenez (2020b). Valorization of digestates from urban or centralized biogas plants: a critical review. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, <https://dx.doi.org/10.1007/s11157-020-09531-3>, <https://hal.inrae.fr/hal-02571756>
- Felipe Guilayn, Julie Jimenez, Jean-Luc Martel, Maxime Rouez, Marion Crest, Dominique Patureau (2019a). First fertilizing-value typology of digestates: A decision-making tool for regulation. *Waste Management*, 86 67-79, <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.032>, <https://hal.inrae.fr/hal-02627223>
- 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>
- 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, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.07.037>, <https://hal.inrae.fr/hal-01535235>
- 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, 359-37, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.048>
- 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, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.176>, <https://hal.inrae.fr/hal-01543454>
- Géraldine Maynaud, Dominique Steyer, Céline Druilhe, Christine Ziebal, Julie Jimenez, Michel Torrijos, Anne Marie Pourcher, Nathalie Wéry (2017a). 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>
- Géraldine Maynaud, Céline Druilhe, Mylène Daumoin, Julie Jimenez, Dominique Patureau, Michel Torrijos, Anne-Marie Pourcher, Nathalie Wéry (2017b). Characterisation of the biodegradability of post-treated digestates via the chemical accessibility and complexity of organic matter. *Bioresource Technology*, 213 65–74, <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.057>, <https://hal.inrae.fr/hal-01606007>, <https://insu-toulouse.fr/hal-02904361>

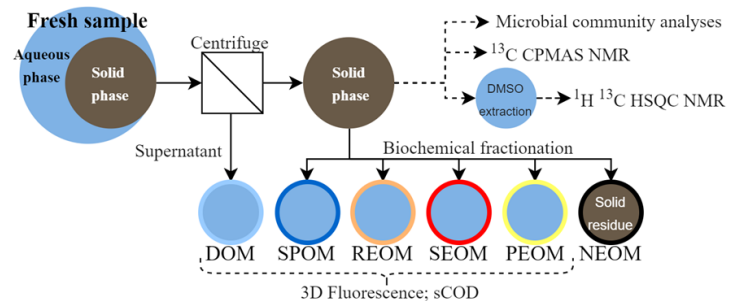
Annexes

Etude en cours...

Thèse David Fernandez-Dominguez (2020-2023)

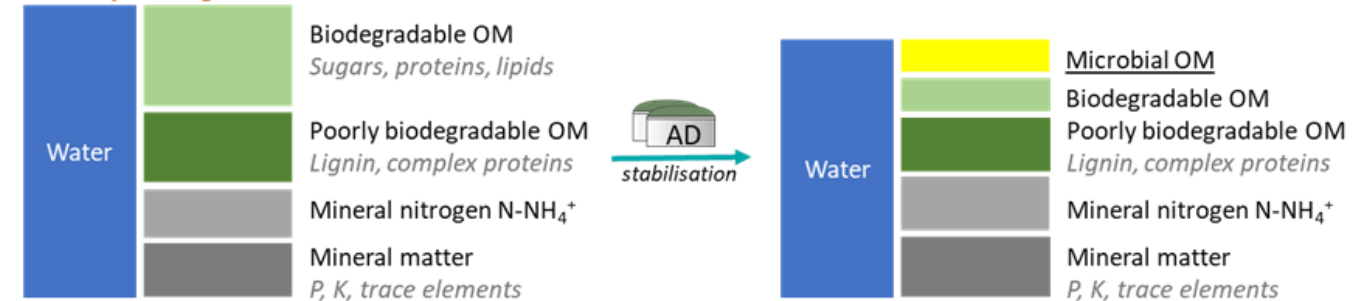
Compréhension des mécanismes de complexification de la MO pendant la méthanisation

Thèse David Fernandez (2023)

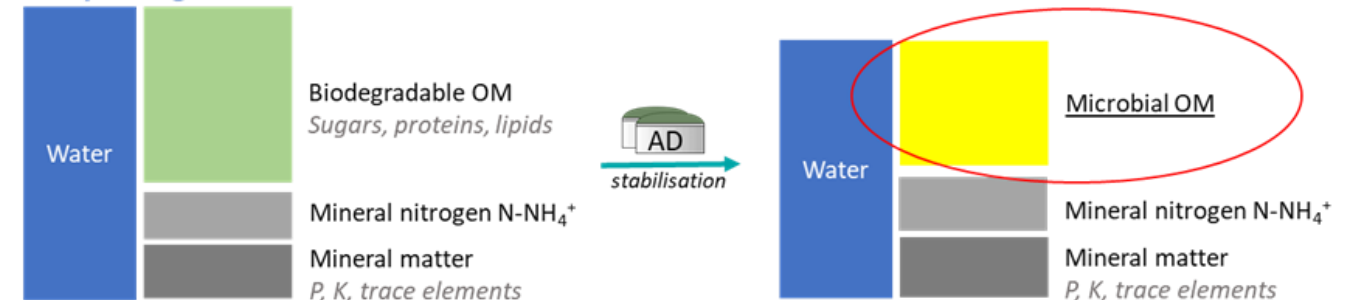


MO endogène (micro-organismes) vs MO exogène (intrants)

Partially biodegradable substrate

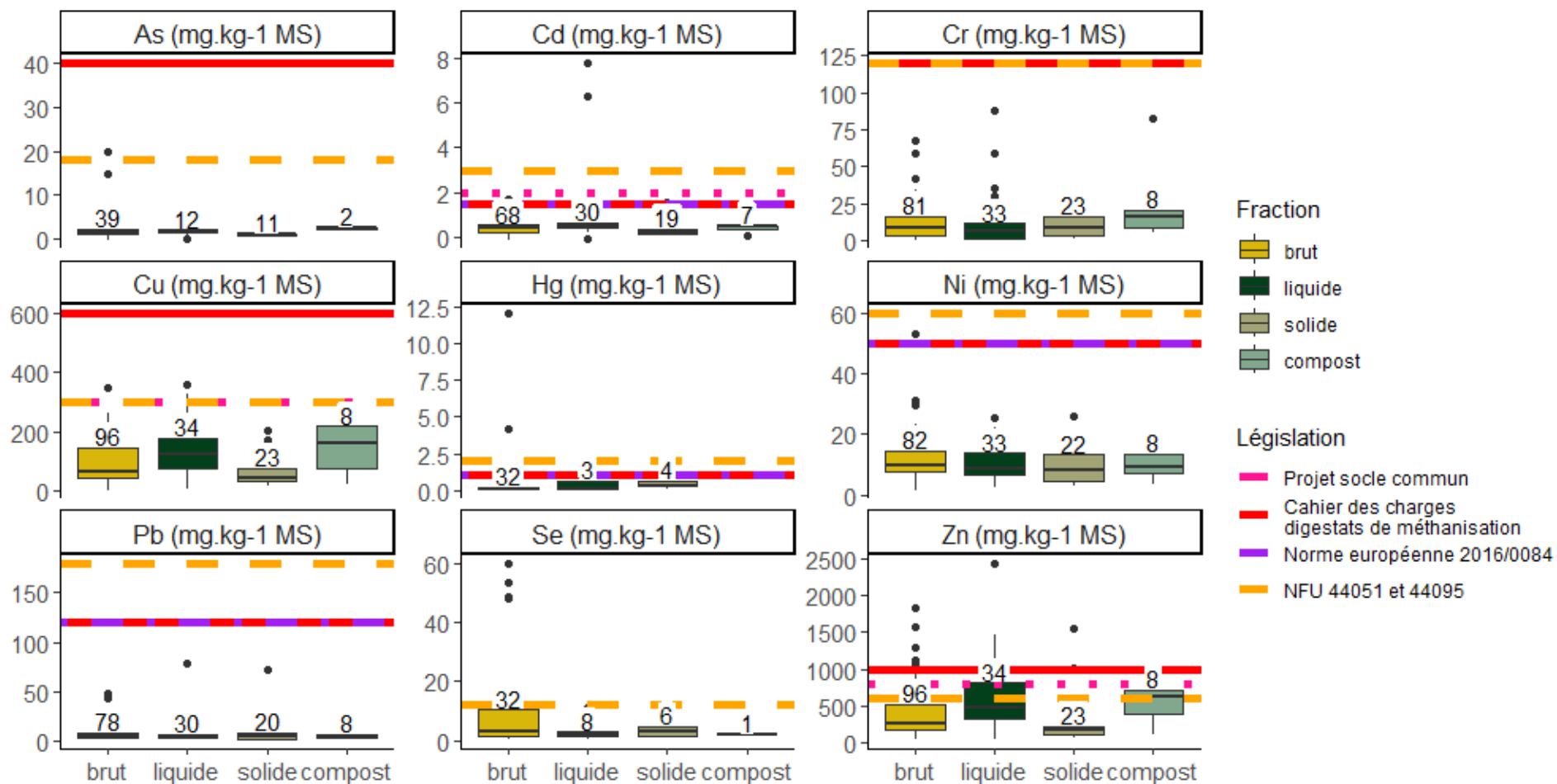


Totally biodegradable substrate

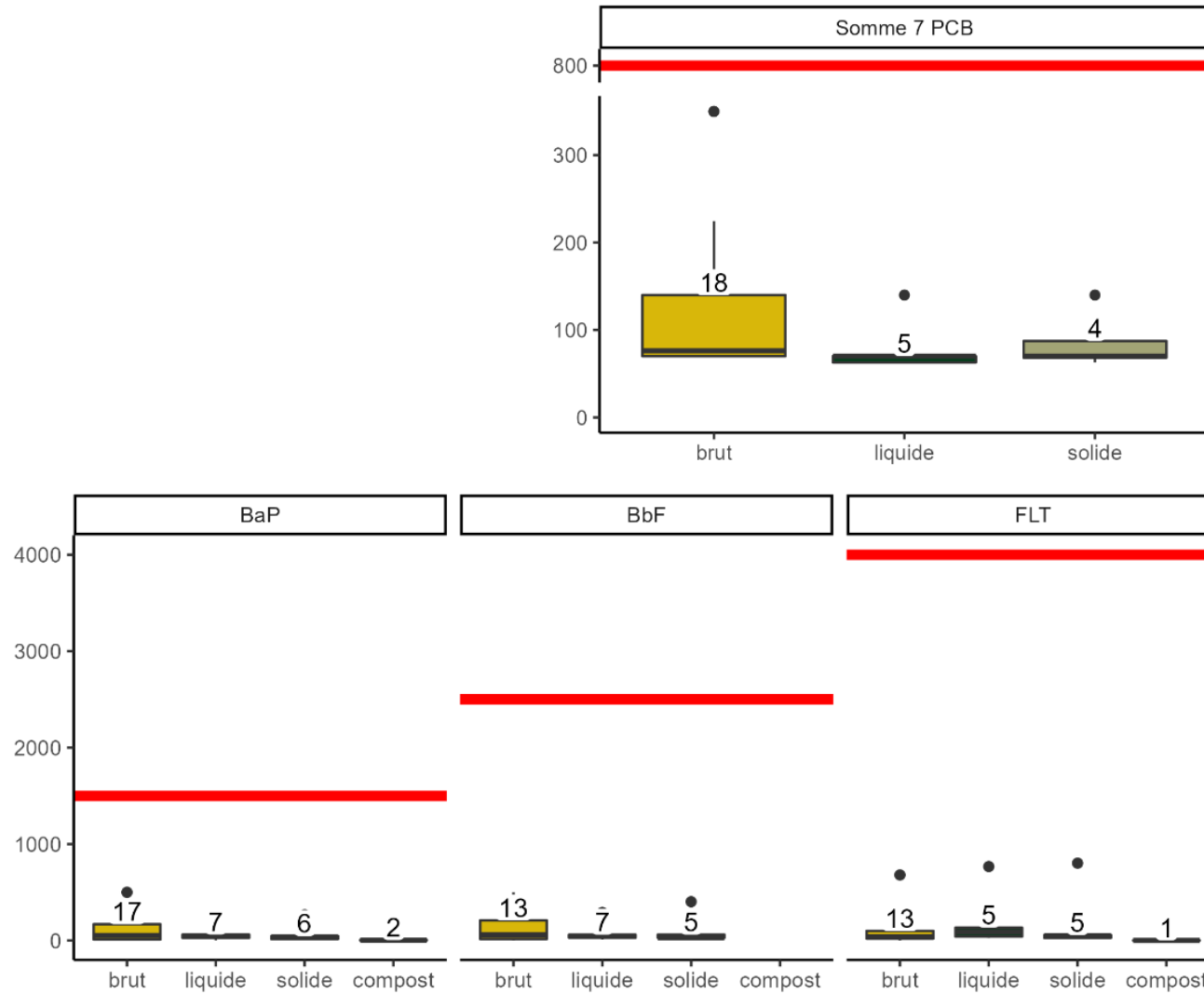


Mise en évidence de l'évolution MO endogène vs exogène lors de la biodégradation
Lien intéressant avec les communautés microbiennes

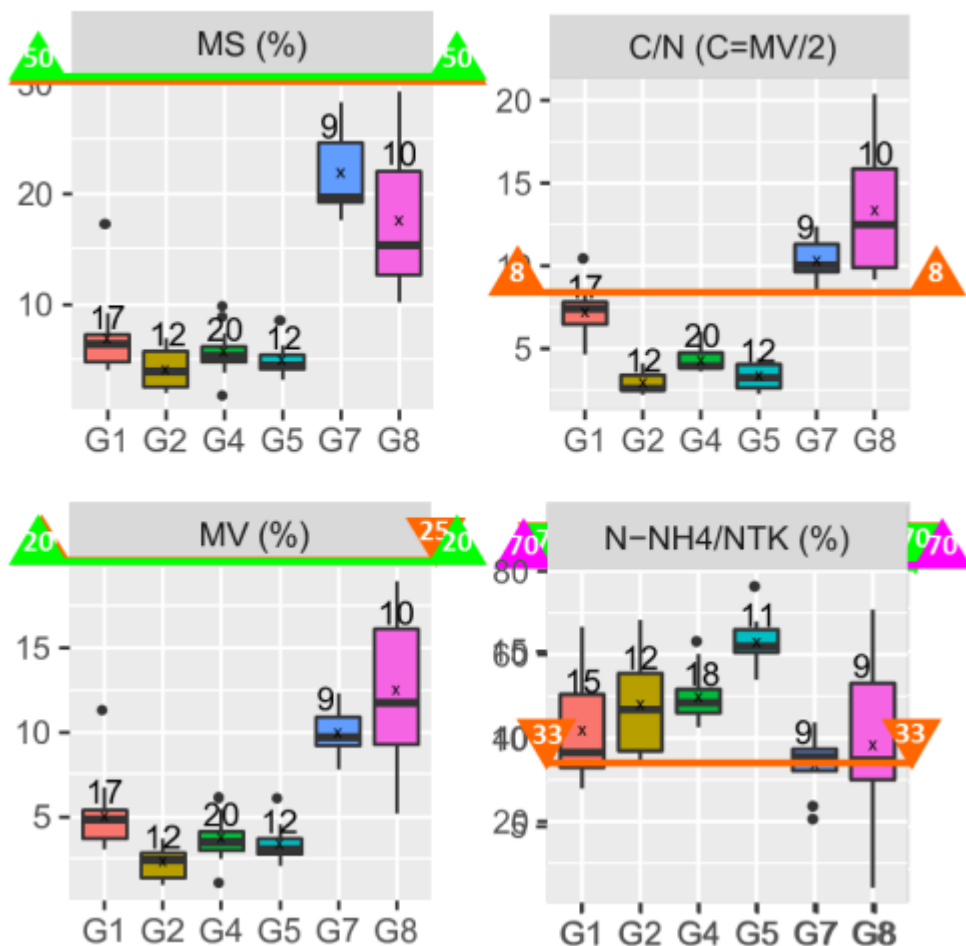
Réglementation (1)



Réglementation (2)



Réglementation



Groupes Boxplot = Groupes Clustering

Procédé	Intrant(s) majeur(s)
DA voie humide	1. Fumiers, résidus d'ensilage
	2. Boues STEP, biodéchets, IAA
	3.(n=2) Déchets verts et lactose
	4. Co-digestion ferme (équilibrée)
	5. Lisier porcin
DA voie sèche	6. (n=4) Percolation, FFOM (labo)
	7. FFOM ou biodéchets
	8. Fumiers bovins principalement

Légende - Normes Françaises

▲ NFU 44051	▲ NFU 44095	▲ Valeur min.
▲ NFU 42001 Class VI		▲ Valeur max.

- **pas assez secs (MS), trop minéralisé (NH₄/TN), pas assez organique (MV) pour norme amendement organique**
- **pas assez NPK pour atteindre la norme fertilisants**