

> HELIOSPIR – 25/06/2025

Prédiction du carbone minéralisable au sol (C_{min91}) des digestats de méthanisation grâce à la SPIR

Jessica DO SOUTO SOEIRO – INRAE (LBE)

Eric LATRILLE – INRAE (LBE)

Virginie ROSSARD – INRAE (LBE)

Bastien ZENNARO – INRAE (METYS)

Julie JIMENEZ – INRAE (LBE)



*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

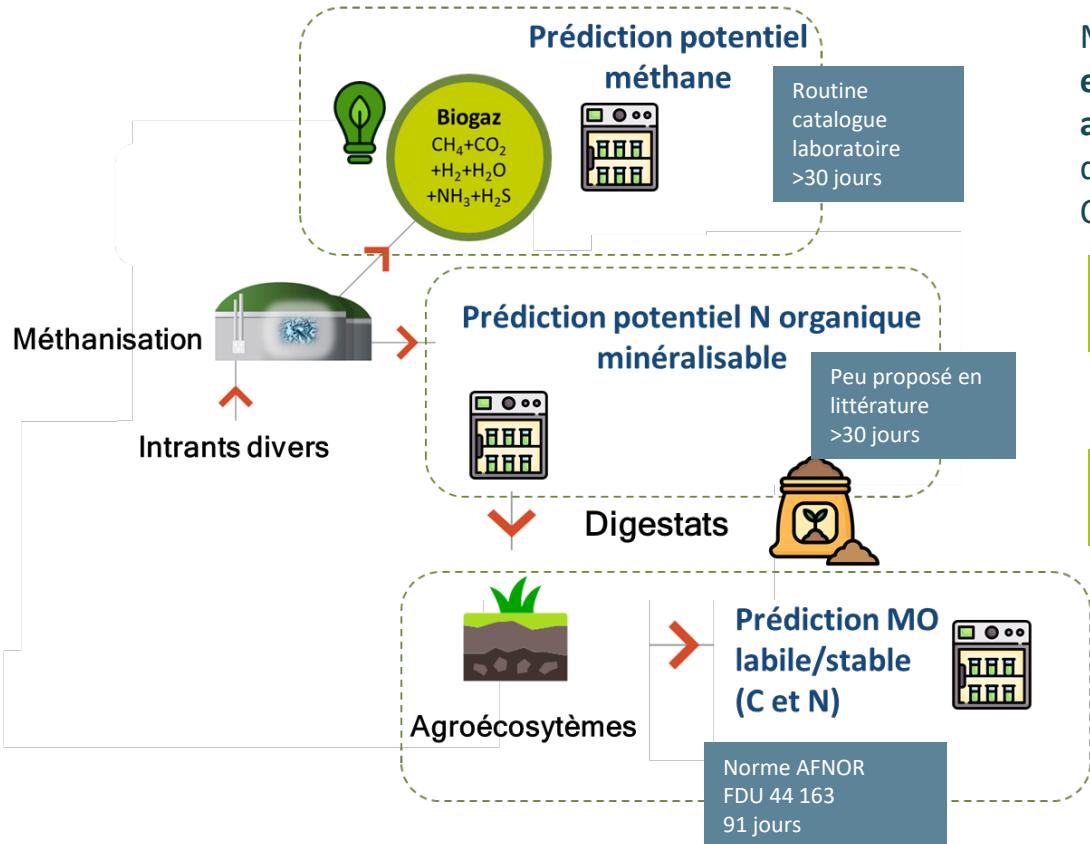


> CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE



➤ CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le projet METHASOLCN (3BCar 2024-2025)



Méthanisation des résidus organiques : **double enjeu de transition énergétique et agroécologique**, avec production de méthane et digestats,
Optimisation = **permettre durabilité du procédé**



FOCUS sur la **prédiction du potentiel de minéralisation du carbone organique au sol ($\text{C}_{\text{min}91}$) sur les digestats grâce à la SPIR**

MO = Matière organique

C = Carbone

N = Azote

INRAE

HélioSPIR – Prédiction du potentiel de minéralisation du carbone au sol ($\text{C}_{\text{min}91}$) des digestats de méthanisation grâce à la SPIR

25/06/2025 – Jessica DO SOUTO SOEIRO et al.



> MATERIELS ET METHODES

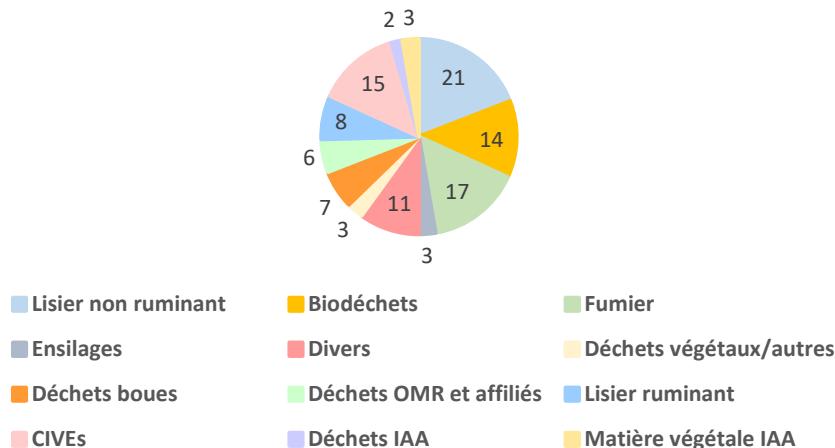


INRAE

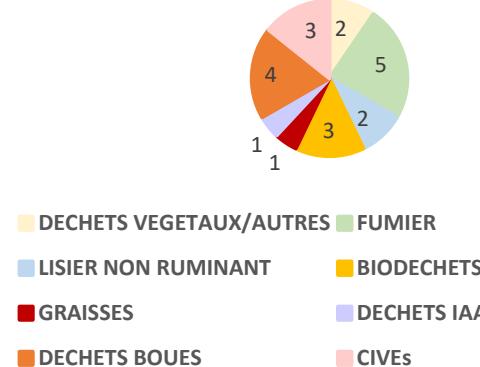
➤ MATERIELS ET METHODES

Echantillons utilisés pour la construction d'un modèle de prédiction pour le potentiel de minéralisation du carbone au sol (C_{min91}) de digestats de méthanisation

Répartition des digestats utilisés dans le jeu de calibration selon la catégorie d'intrant principal



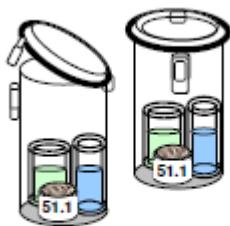
Répartition des digestats utilisés dans le jeu de validation externe selon la catégorie d'intrant principal



Au total, **131 digestats** (liquides, solides, composts, bruts) utilisés pour cette étude dont **110 en calibration** et **21 en validation externe**.

➤ MATERIELS ET METHODES

Protocole de mesure du potentiel de minéralisation du carbone au sol (C_{min91}) en laboratoire (Norme AFNOR FD U44-163)^[1]



1. Dispositif CARBONE
en bocaux hermétiques



Capsule contenant : le « sol seul » ou le « sol + produit » ou le « sol + standard » + l'eau ajoutée pour rapporter le sol à l'humidité souhaitée (pF 2.5)



Pilulier d'eau pour maintenir en partie l'humidité



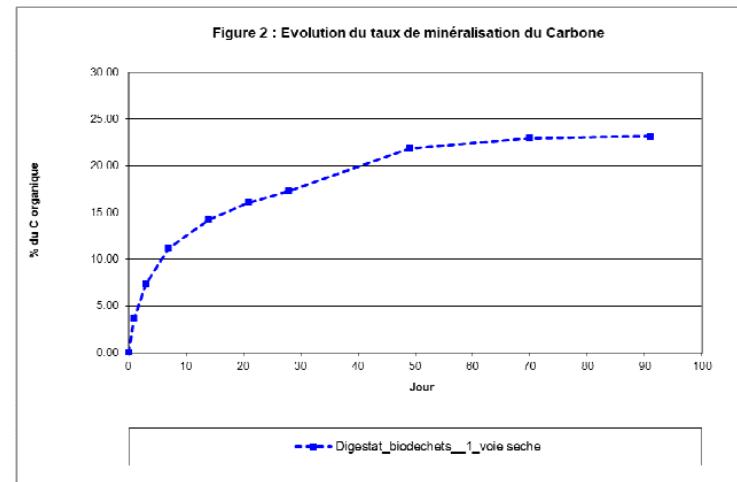
Pilulier de soude pour piéger le CO₂ dégagé



Joint caoutchouc pour fermer hermétiquement les bocaux de carbone

Schéma du dispositif permettant d'obtenir les mesures du potentiel de minéralisation C_{min91}

[1] Norme AFNOR FD U44-163 février 2018 – Amendements organiques et supports de culture – Caractérisation de la matière organique par la minéralisation potentielle du carbone et de l'azote

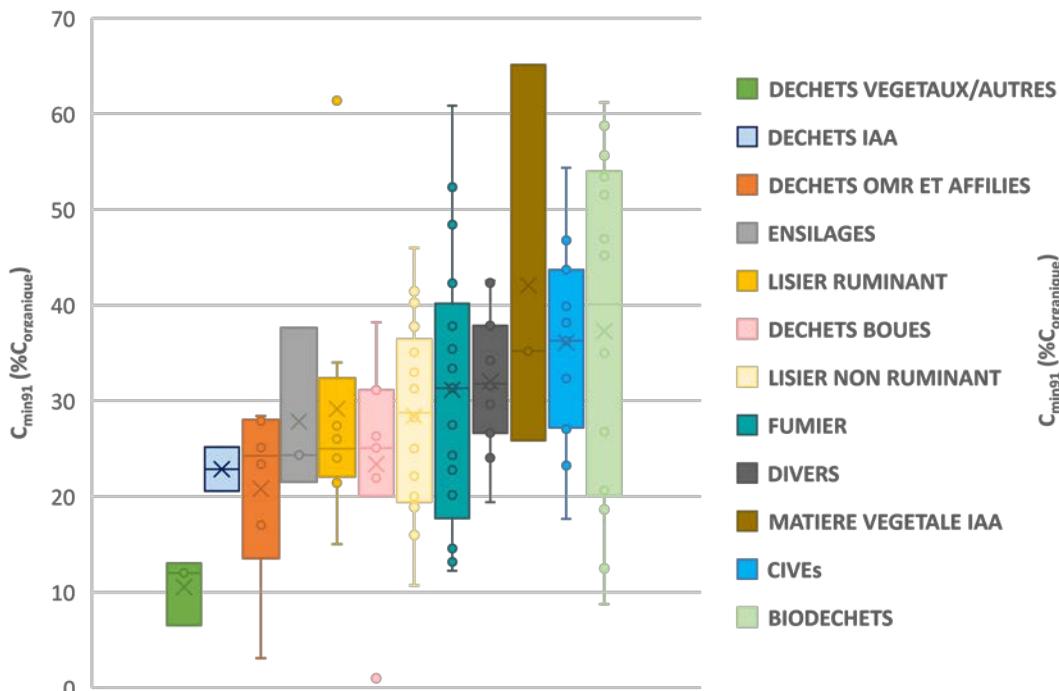


Graphique montrant l'évolution du taux de minéralisation du carbone organique en CO₂ pour un digestat

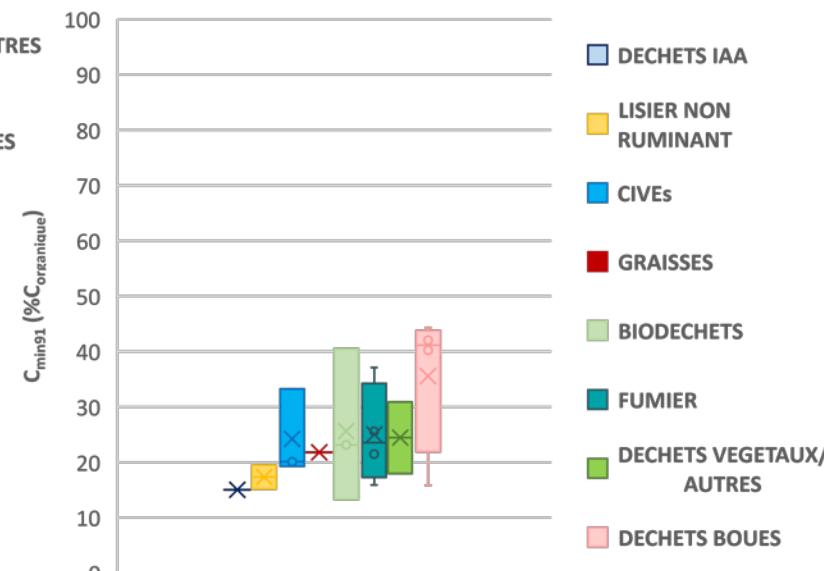
➤ MATERIELS ET METHODES

Gamme de la variable à prédire dans les jeux de calibration et de validation externe

Répartition des valeurs de C_{min91} dans le jeu de calibration selon la catégorie d'intrant principal



Répartition des valeurs de C_{min91} dans le jeu de validation externe selon la catégorie d'intrant principal



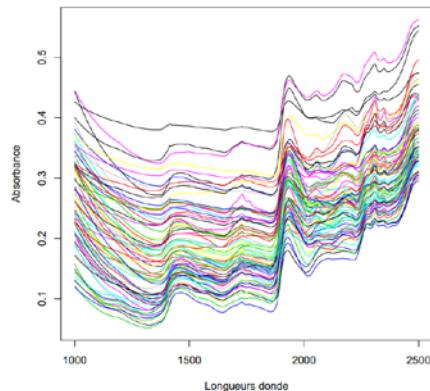
➤ MATERIELS ET METHODES

Procédure d'obtention des spectres

Echantillons lyophilisés et broyés à 1 mm



Spectrophotomètre proche infra-rouge BÜCHI
Mode réflectance
4000 à 10000 cm⁻¹



Sortie de spectres

ChemFlow



INRAE

HélioSPIR – Prédiction du potentiel de minéralisation du carbone au sol (C_{min91}) des digestats de méthanisation grâce à la SPIR

25/06/2025 – Jessica DO SOUTO SOEIRO et al.

➤ MATERIELS ET METHODES

Méthodologie de construction de modèle

Visualisation des effets sur les spectres dus à la diffusion de la lumière



Application de prétraitements pour corriger ses effets sur les spectres



Régression sur le jeu de calibration



Application du modèle calibré sur le jeu de validation externe



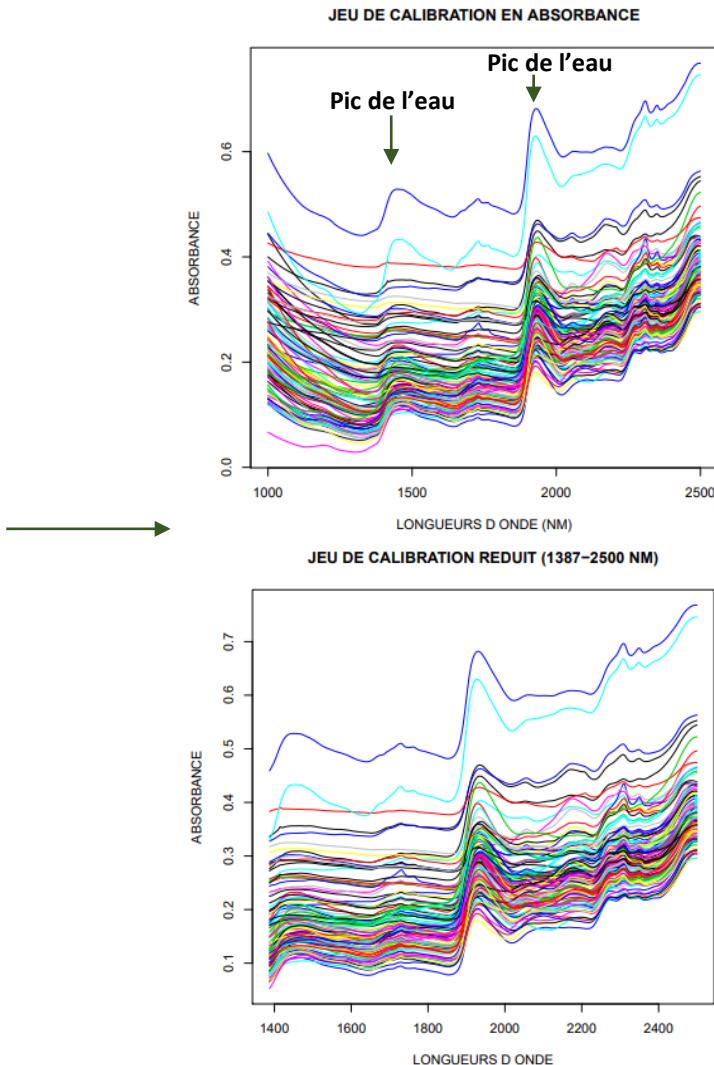
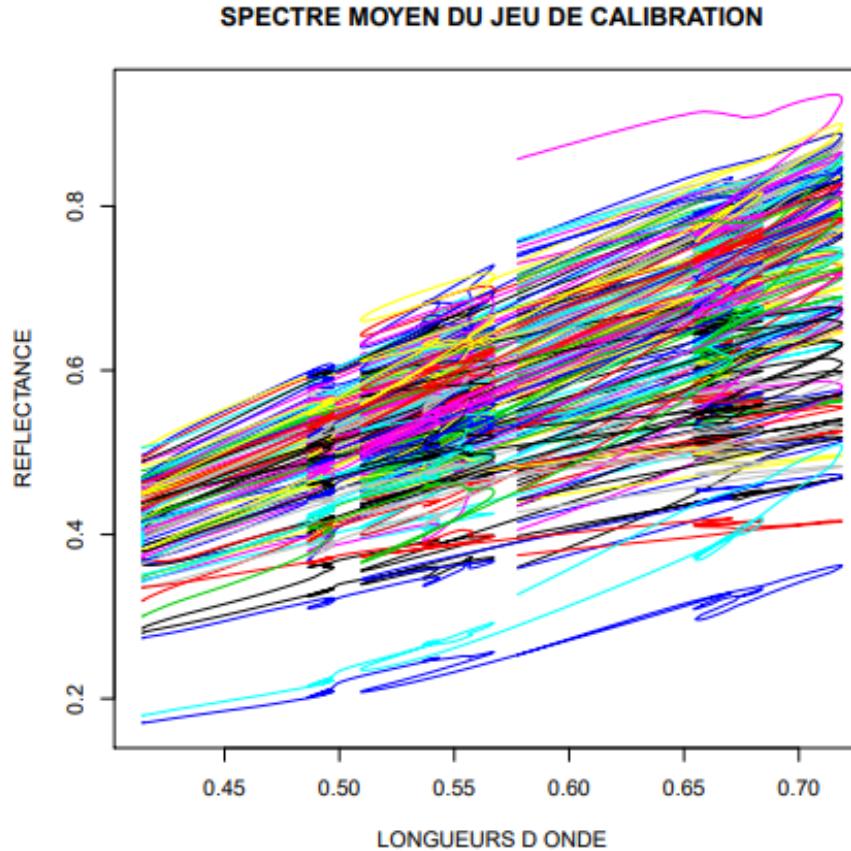
> RESULTATS



INRAE

RESULTATS

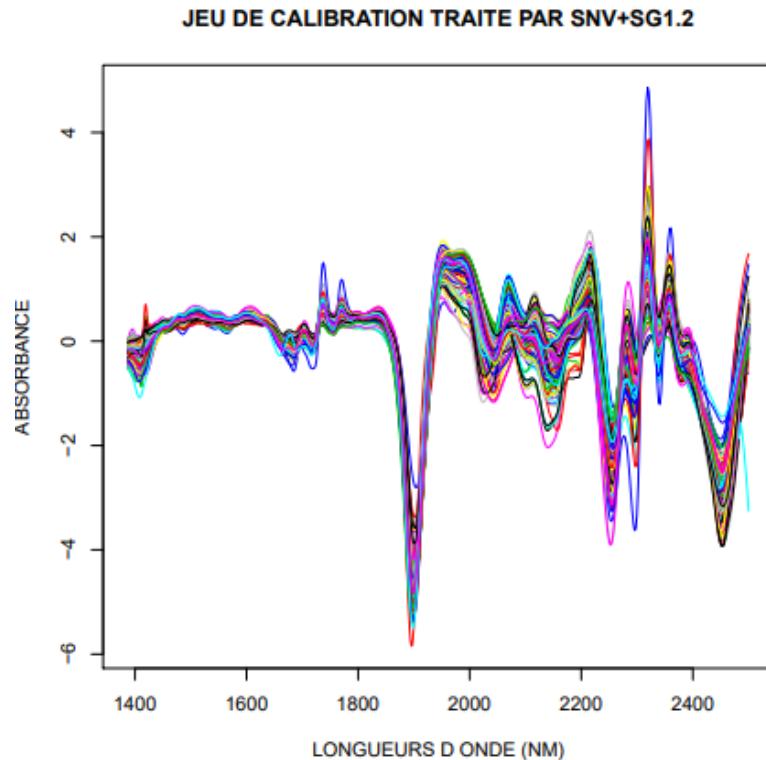
Spectres du jeu de calibration



➤ RESULTATS

Prétraitement : SAVITSKY-GOLAY + SNV

[2]PARAMETRES SAVITSKY-GOLAY :
- Dérivée 1
- Fenêtre 13
- Degré de polynôme 2



[2] <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115393>

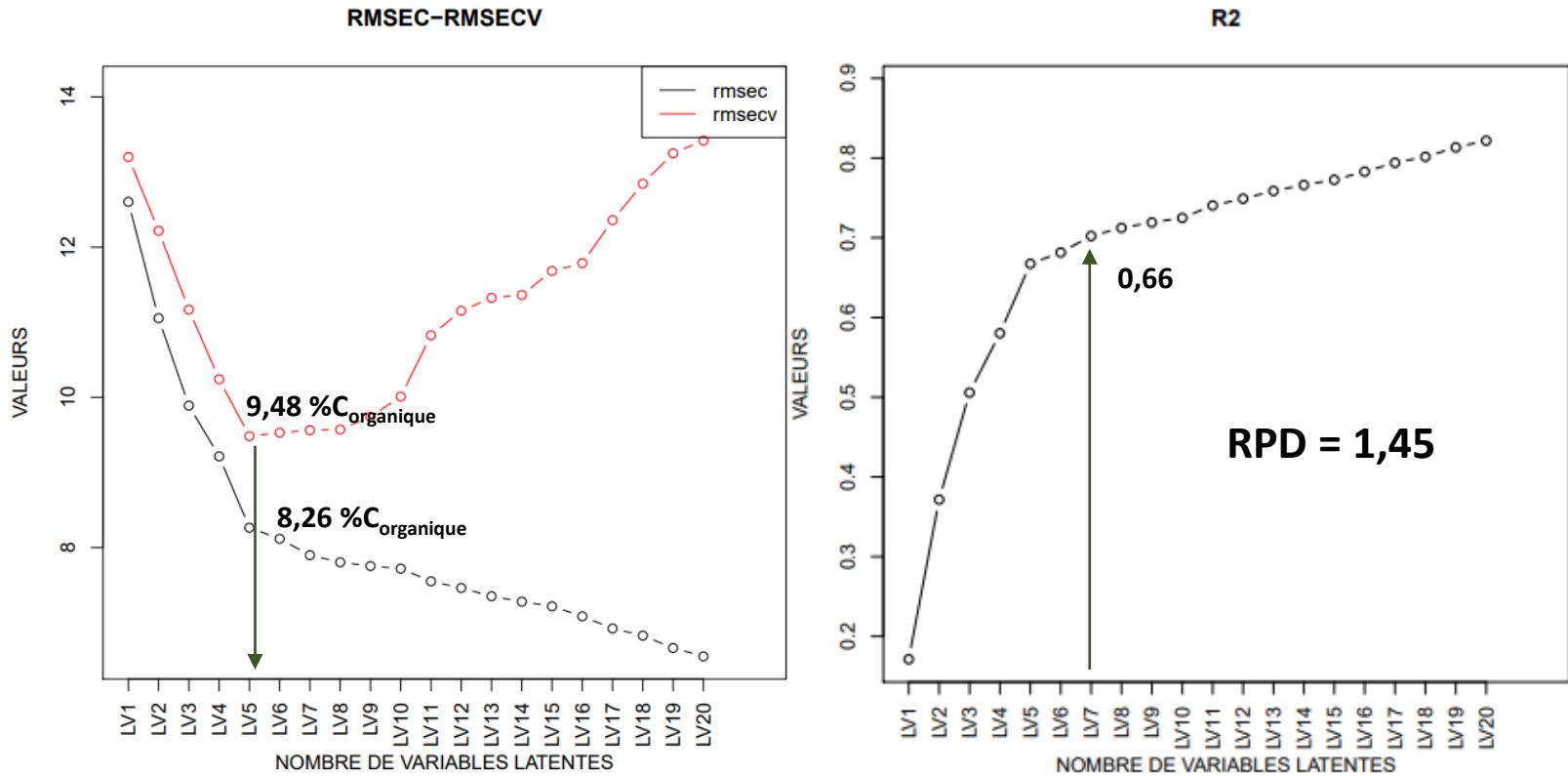
INRAE

HélioSPIR – Prédiction du potentiel de minéralisation du carbone au sol (C_{min91}) des digestats de méthanisation grâce à la SPIR

25/06/2025 – Jessica DO SOUTO SOEIRO et al.

➤ RESULTATS

PLSR sur le jeu de calibration et en cross-validation



RPD = ratio performance/déviation du modèle en utilisant l'écart-type

PARAMETRES DE REGRESSION :

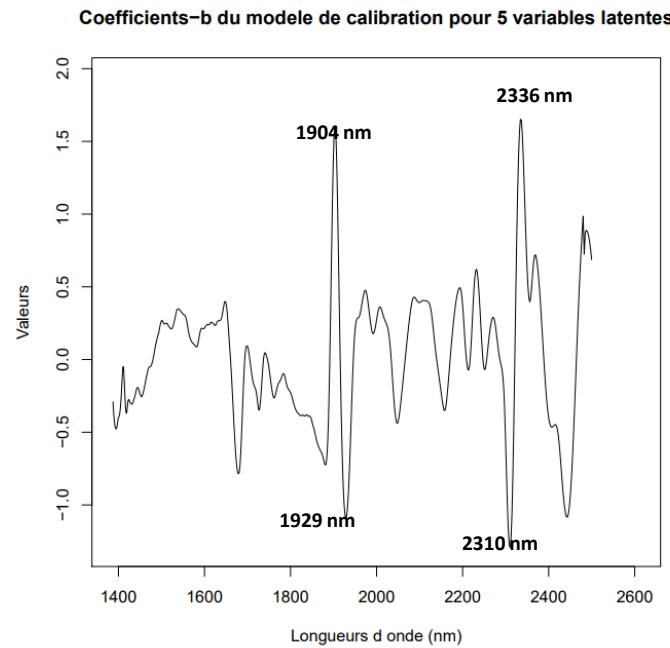
- Type de cross-validation : random k-folds
- Nombre de blocs : 13
- Nombre de répétitions : 4
- Algorithme : NIPALS
- 5 variables latentes

INRAE

HélioSPIR – Prédiction du potentiel de minéralisation du carbone au sol (C_{min91}) des digestats de méthanisation grâce à la SPIR

RESULTATS

PLSR sur le jeu de calibration et cross-validation



- Autour de 1900 nm : pic de l'eau,
- 2000-2500 nm : associées à de la matière organique complexe (protéines, lignines, lipides).

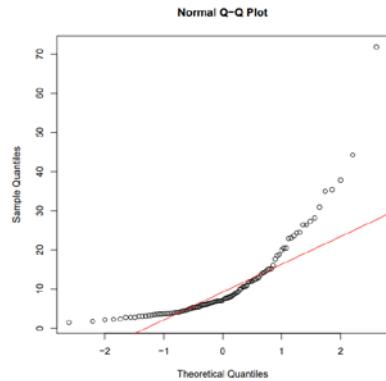
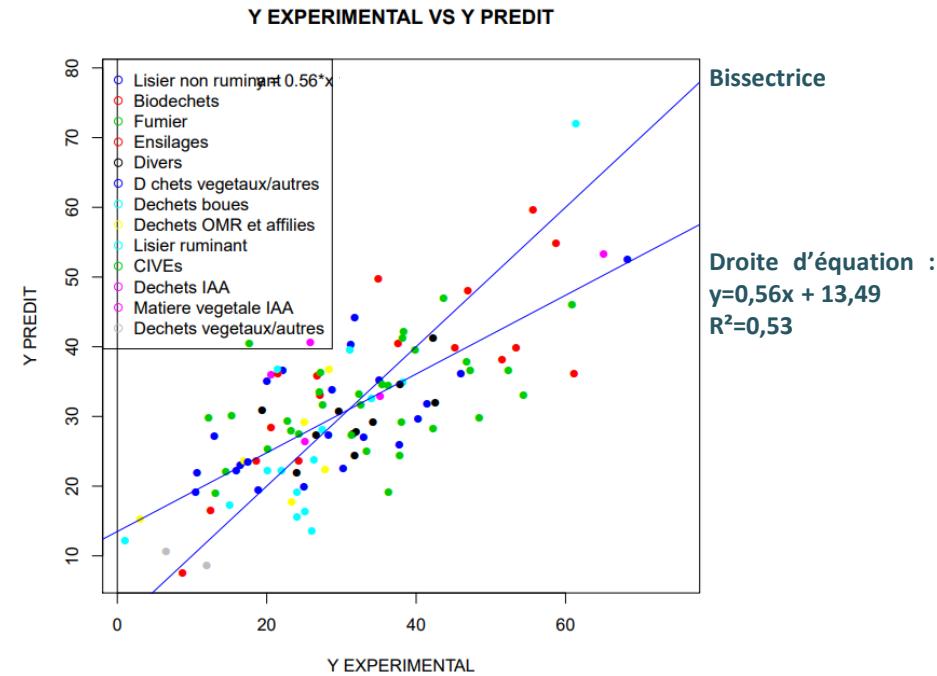
[3] doi:10.1016/j.trac.2010.05.006

[4] Nawouar et al. (2017)

INRAE

HélioSPIR – Prédiction du potentiel de minéralisation du carbone au sol (C_{min91}) des digestats de méthanisation grâce à la SPIR

25/06/2025 – Jessica DO SOUTO SOEIRO et al.

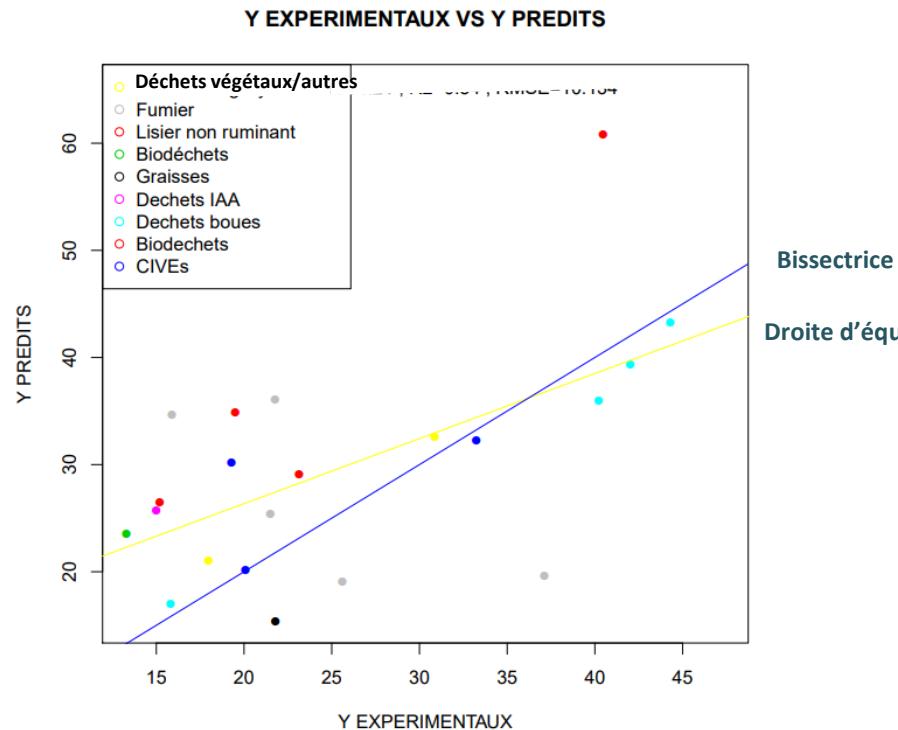


RPIQ = 0,96

RPIQ = ratio performance/déviation du modèle en utilisant les quartiles

➤ RESULTATS

Test du modèle de calibration sur le jeu de validation externe



$$\text{RMSEP} = 10,13 \, \% \text{C}_{\text{organique}}$$

$$R^2 = 0,34$$

$$\text{RPD} = 1$$

$$\text{RPIQ} = 1,50$$

SEL (Standard Error of Laboratory) = 6,49 %C_{organique}

RPD = ration performance/déviation du modèle

INRAE

HélioSPIR – Prédiction du potentiel de minéralisation du carbone au sol (C_{min91}) des digestats de méthanisation grâce à la SPIR

25/06/2025 – Jessica DO SOUTO SOEIRO et al.



> CONCLUSION ET PERSPECTIVES



➤ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

CONCLUSIONS

- Large gamme de digestats provenant de divers intrants,
- Gamme de C_{min91} large : $1,1 \%C_{organique} < C_{min91_calibration} < 68,27 \%C_{organique}$ et $13,3 \%C_{organique} < C_{min91_validation} < 44,28 \%C_{organique}$
- Quelques modèles existants^[3] sur la prédiction de cette variable mais ce modèle est le premier concernant seulement les digestats,
- Modèle choisi : pré-traitements **SG dérivée 1/polynôme 2 + SNV**, **RMSEC=8,26 %C_{organique}**, **RMSECV = 9,48 %C_{organique}** et **RMSEP = 10,13 %C_{organique}** (**SEL = 6,49 %C_{organique}**)

PERSPECTIVES

- Tester des méthodes de régression non linéaire comme Random Forest,
- Décliner cette méthode à la prédiction de l'azote minéralisable au sol (N_{min91}).

[3] <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.09.036>



> MERCI POUR VOTRE ATTENTION



INRAE