

# Quantifier et comprendre la stabilité biogéochimique du carbone organique dans les sols français

## Séminaire ÉcoScience

Amicie DELAHAIE

27 Septembre 2024

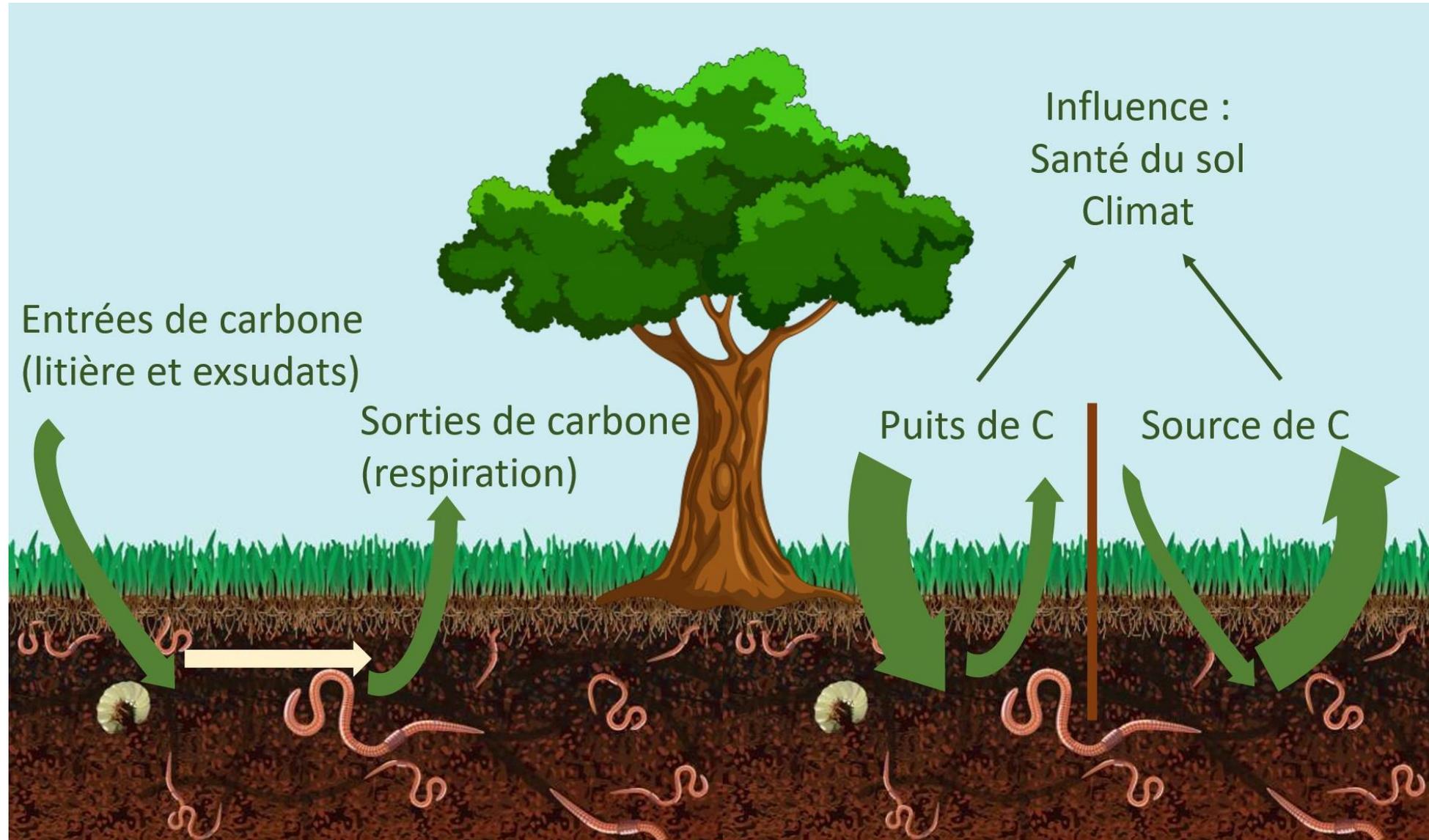
EcoSys - INRAE

Aperçu de mes travaux de thèse



# INTRODUCTION

# La dynamique du COS : des entrées et des sorties



# Le carbone, crucial pour l'agriculture et le climat



## Atténuation climatique

(Sanderman et al., 2009 ; Paustian et al., 2019 ;  
initiative *4pour1000*)



## Fertilité, santé des sols

# Le carbone, crucial pour l'agriculture et le climat



Atténuation climatique

(Sanderman et al., 2009 ; Paustian et al., 2019 ;  
initiative *4pour1000*)

Fertilité, santé des sols

# Le carbone, crucial pour l'agriculture et le climat



Atténuation climatique

(Sanderman et al., 2009 ; Paustian et al., 2019 ;  
initiative *4pour1000*)

Fertilité, santé des sols

# Le carbone, crucial pour l'agriculture et le climat



Atténuation climatique

(Sanderman et al., 2009 ; Paustian et al., 2019 ;  
initiative *4pour1000*)

Fertilité, santé des sols

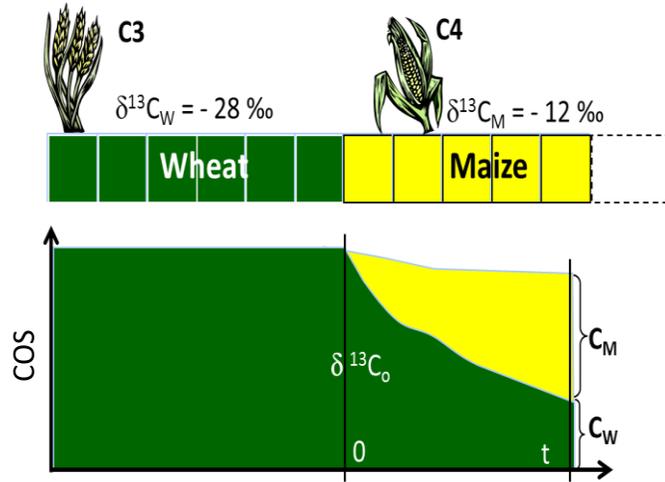
# La nécessité de mesurer la stabilité biogéochimique pour connaître le bilan

Bilan de C = Entrées - Sorties = Entrées - f(**stabilité biogéochimique**)

...mais que sait-on de celle-ci ?

# Des dispositifs de mesure de la stabilité biogéochimique très précis...

Adapté de Balesdent, 1991

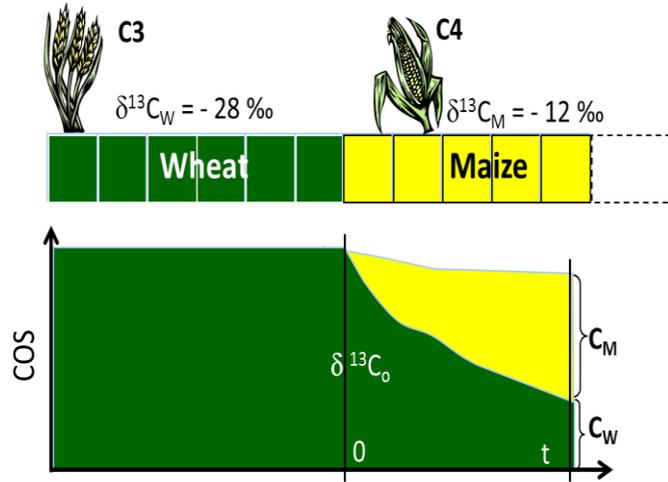


## Chronoséquence C3-C4

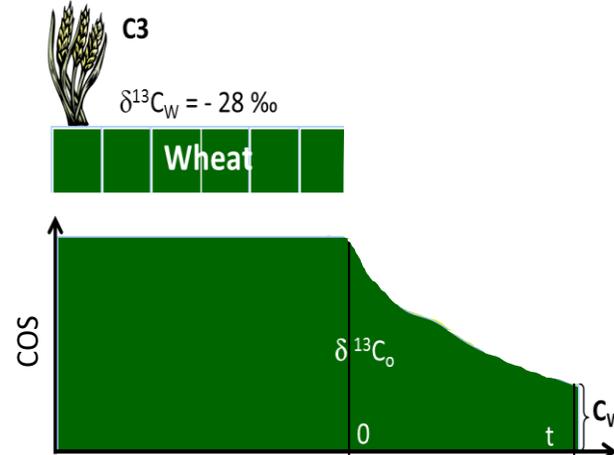
Balesdent et al. (1987) dans  
une prairie américaine :  
50% du COS persiste plus de  
100 ans

# Des dispositifs de mesure de la stabilité biogéochimique très précis...

Adapté de Balesdent, 1991



**Chronoséquence C3-C4**



**Jachère nue de longue durée**

Balesdent et al. (1987) dans une prairie américaine :  
50% du COS persiste plus de 100 ans

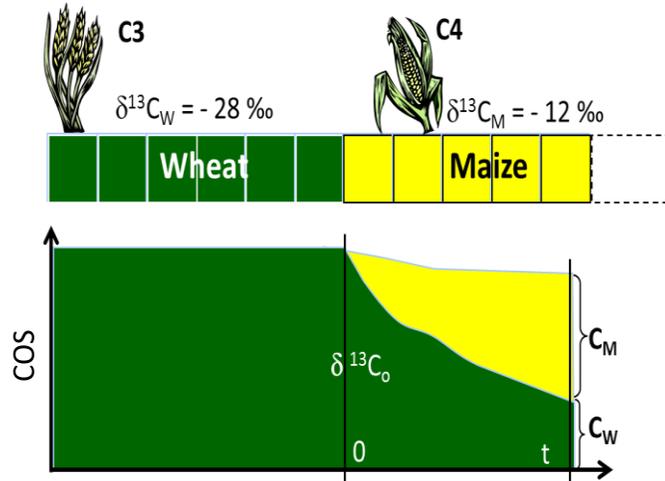
Barré et al. (2010) :  
30 – 70% du COS apparaît inerte à l'échelle du siècle

# Des dispositifs de mesure de la stabilité biogéochimique très précis...

$$\Delta \text{stock} = \text{Entrées} - \text{Sorties}$$

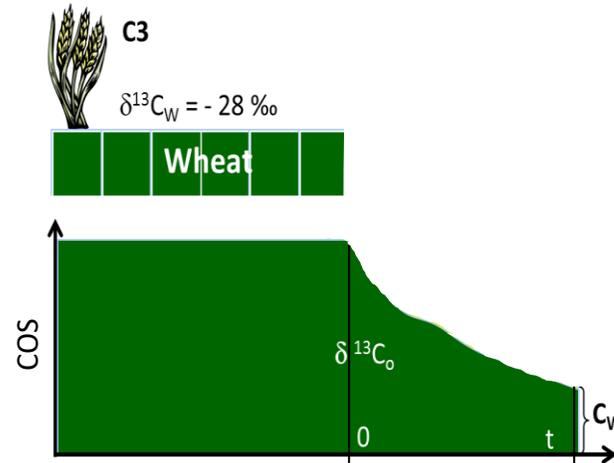
$$\text{connu} = \text{connu} - ?$$

Adapté de Balesdent, 1991



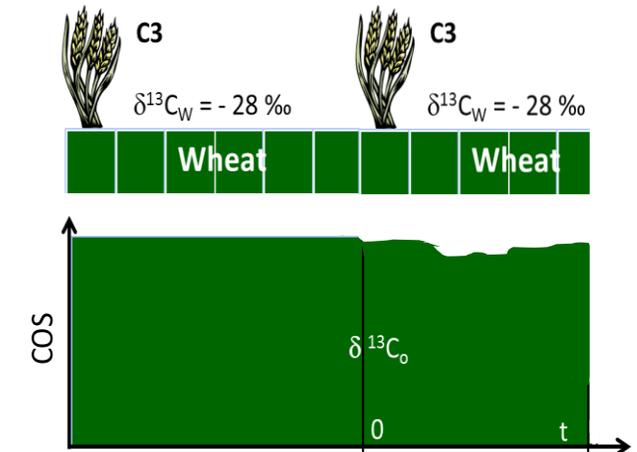
**Chronoséquence C3-C4**

Balesdent et al. (1987) dans une prairie américaine :  
50% du COS persiste plus de 100 ans



**Jachère nue de longue durée**

Barré et al. (2010) :  
30 – 70% du COS apparaît inerte à l'échelle du siècle



**Expériences agronomiques de longue durée avec entrées de C connues**

Clivot et al. (2019) :  
40 – 70% du COS apparaît inerte à l'échelle du siècle

# La nécessité de mesurer la stabilité biogéochimique pour connaître le bilan

Bilan de C = Entrées - Sorties = Entrées - f(**stabilité biogéochimique**)

...mais que sait-on de celle-ci ?

On peut distinguer le COS en 3 compartiments cinétiques (Balesdent, 1988 ; Parton et al., 1987) :

**Labile** : 1-5 % du COS, MRT  $\approx$  1 à 5 ans

**Actif/Intermédiaire** : MRT  $\approx$  30 à 40 ans

**Stable/Inerte** : 30-70 % du COS, MRT > 200 ans

# La nécessité de mesurer la stabilité biogéochimique pour connaître le bilan

Bilan de C = Entrées - Sorties = Entrées - f(**stabilité biogéochimique**)

...mais que sait-on de celle-ci ?

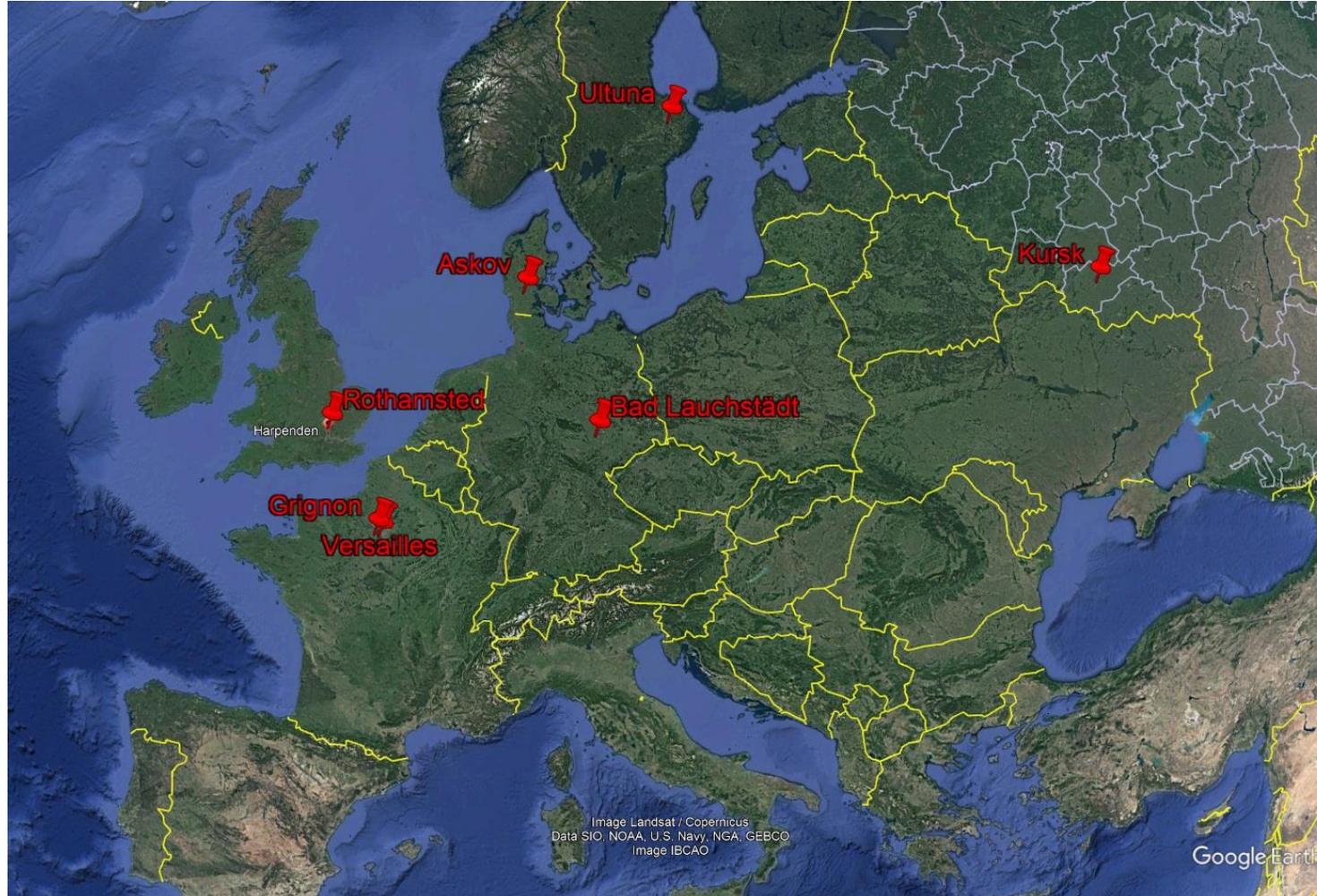
On peut distinguer le COS en 3 compartiments cinétiques (Balesdent, 1988 ; Parton et al., 1987) :

~~Labile : 1-5 % du COS, MRT ≈ 1 à 5 ans~~    **NÉGLIGEABLE en terme de stocks**

**Actif/Intermédiaire** : MRT ≈ 30 à 40 ans

**Stable/Inerte** : 30-70 % du COS, MRT > 200 ans

...mais très rares !



Sites de **jachères nues (7)** en Europe + quelques sites de **chronoséquences** et d'expériences de longue durée

# La nécessité de mesurer la stabilité biogéochimique pour connaître le bilan

Bilan de C = Entrées - Sorties = Entrées - f(**stabilité biogéochimique**)

...mais que sait-on de celle-ci ?

On peut distinguer le COS en 3 compartiments cinétiques (Balesdent, 1988 ; Parton et al., 1987) :

~~Labile : 1-5 % du COS, MRT ≈ 1 à 5 ans~~    **NÉGLIGEABLE en terme de stocks**

**Actif/Intermédiaire** : MRT ≈ 30 à 40 ans

**Stable/Inerte** : 30-70 % du COS, MRT > 200 ans

→ On a besoin d'indicateurs à l'**échelle pluri-décennale**, utilisables en dehors de ces sites particuliers !

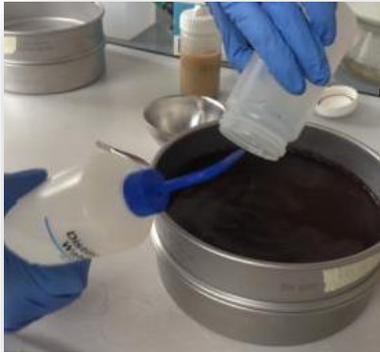
# Un besoin d'indicateurs pour estimer la stabilité biogéochimique

**Fractionnement** : méthode de séparation du COS en plusieurs compartiments

Méthodes physiques  
(nombreux  
fractionnements dont  
POM/MAOM)

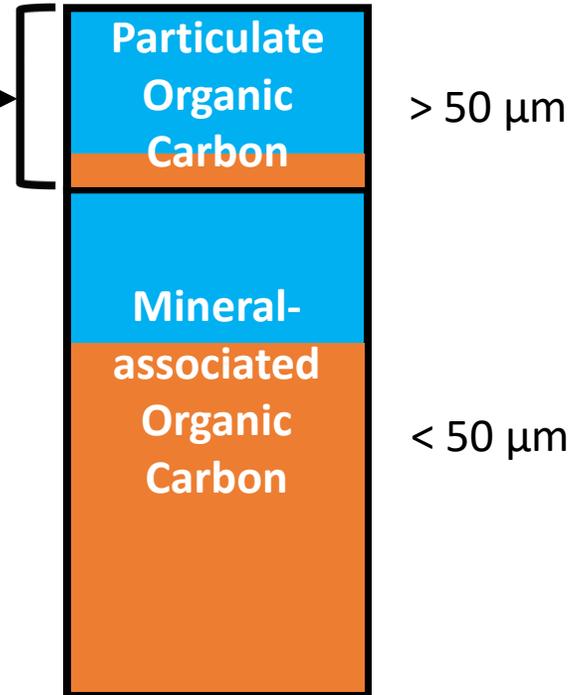
**Méthodes éprouvées**  
POM/MAOM = bon compromis  
simplicité vs information (Poeplau  
et al., 2018, *SBB*)

# Intérêts et limites du fractionnement POM/MAOM (tamisage à 50 $\mu\text{m}$ )



## Fractionnement POM/MAOM

(Cambardella & Elliott, 1992 ;  
Lavallee et al., 2020 ;  
Crédits photo : Mathilde Bryant)



+

Info qualitative assez rapide

Séparation effective de fractions physiques

Pas besoin de matériel sophistiqué

-

Pas de séparation précise par MRT (von Lützow et al., 2006)

■  $C_{\text{stable}}$  : C stable à l'échelle du siècle

■  $C_{\text{labile}}$  : C actif à l'échelle du siècle

# Intérêts et limites du fractionnement POM/MAOM (tamisage à 50 $\mu\text{m}$ )

MAOM

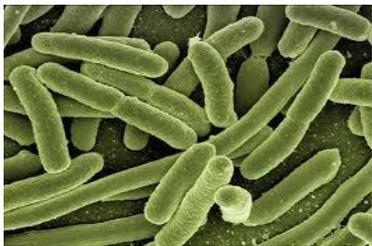


Matière organique associée aux minéraux (MAOM)

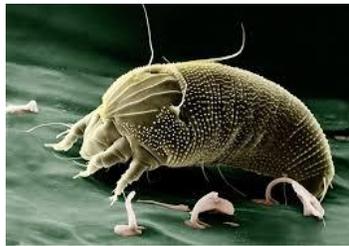
POM



Matière organique particulaire (POM)



Matière organique vivante  
(microorganismes)



Matière organique dissoute



Matière organique pyrogénique

# L'émergence des méthodes thermiques comme alternative ou complément

Méthodes physiques  
(nombreux  
fractionnements dont  
POM/MAOM)

**Méthodes éprouvées**  
POM/MAOM = bon compromis  
simplicité vs information (Poeplau  
et al., 2018, *SBB*)

Méthodes thermiques  
(thermogravimétrie,  
calorimétrie  
différentielle à balayage,  
suivi des gaz générés)

**Méthodes émergentes**  
Plus rapides, très reproductibles  
(Plante et al., 2011 ; Pacini et al., 2023)

## Trois objectifs principaux

Partie I : Les méthodes  
thermiques nous renseignent-  
elles sur la stabilité  
biogéochimique du carbone  
dans les sols ?

## Trois objectifs principaux

Partie I : Les méthodes thermiques nous renseignent-elles sur la stabilité biogéochimique du carbone dans les sols ?

Partie II : Tester l'implémentabilité de l'analyse thermique Rock-Eval® sur des jeux d'échantillons conséquents et discuter de l'information obtenue

## Trois objectifs principaux

Partie I : Les méthodes thermiques nous renseignent-elles sur la stabilité biogéochimique du carbone dans les sols ?

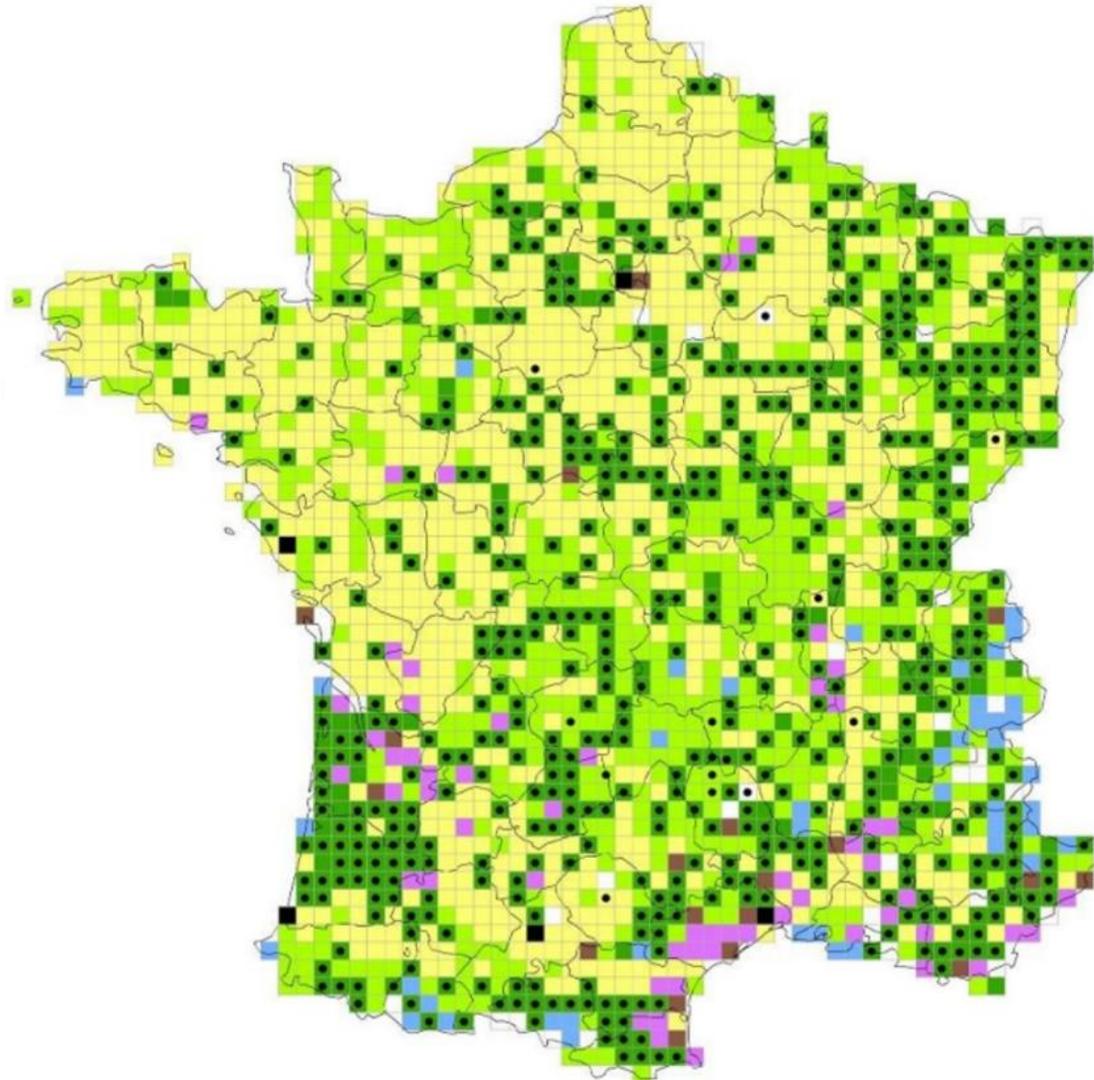
Partie II : Tester l'implémentabilité de l'analyse thermique Rock-Eval® sur des jeux d'échantillons conséquents et discuter de l'information obtenue

Partie III : Comparer les résultats des fractionnements physique et thermique

## Partie II

# Stœchiométrie élémentaire et stabilité thermique de la matière organique des sols français [publié dans SOIL ; Delahaie et al. (2023)]

# Le Réseau de Mesures de la Qualité des Sols

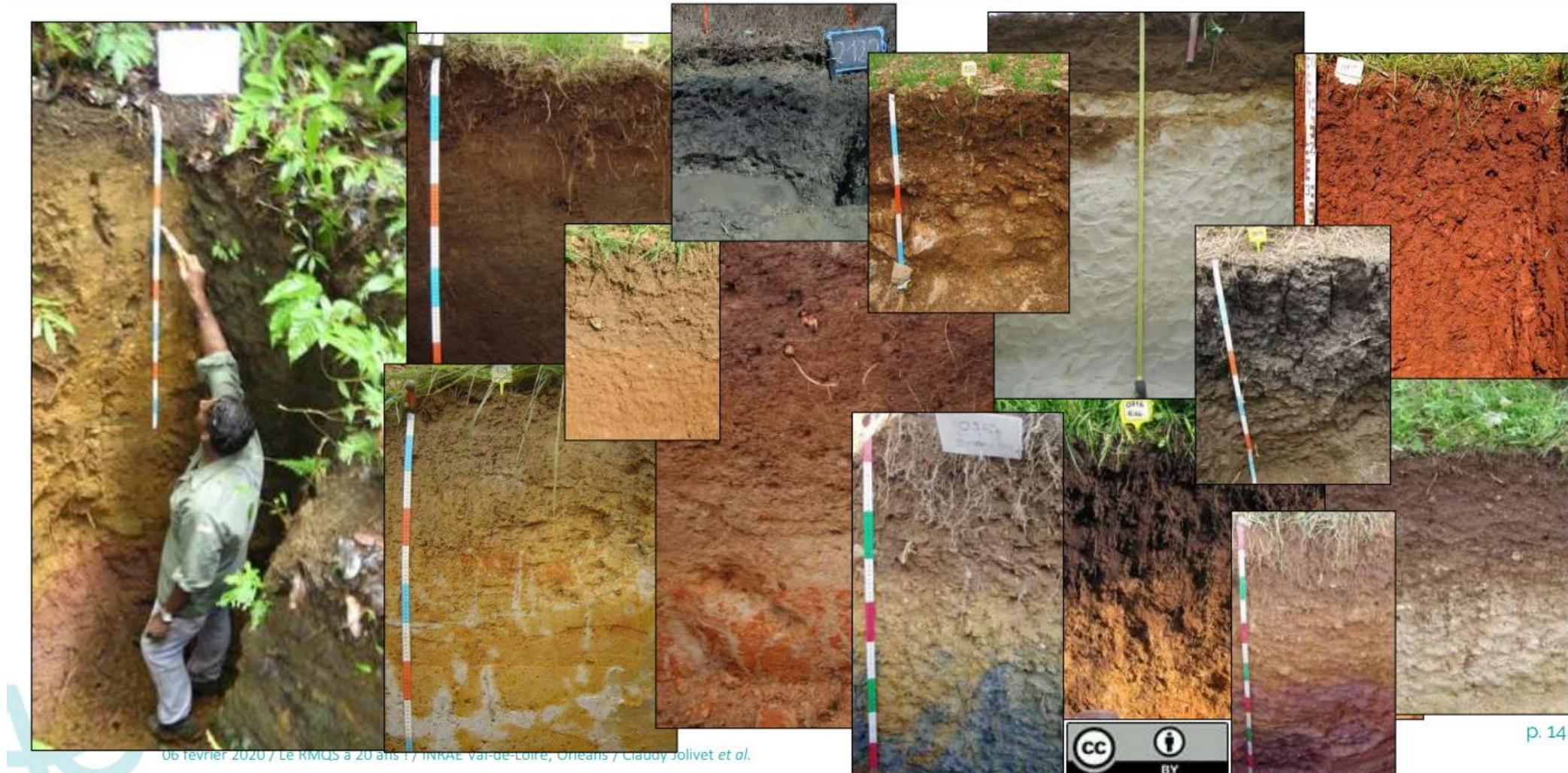


Le RMQS :

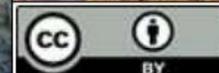
- **2 240 sites !**
- prélevés à plusieurs profondeurs
- un maillage de 16 km × 16 km
- une première campagne de prélèvement d'une décennie
- une deuxième campagne en cours
- 7 occupations des sols
- des prélèvements extrêmement minutieux



# Un travail titanesque !



06 février 2020 / Le RMQS à 20 ans ! / INRAE Val-de-Loire, Orléans / Claudy Jolivet et al.



p. 14

Issu de "Le RMQS à 20 ans !", C. Jolivet

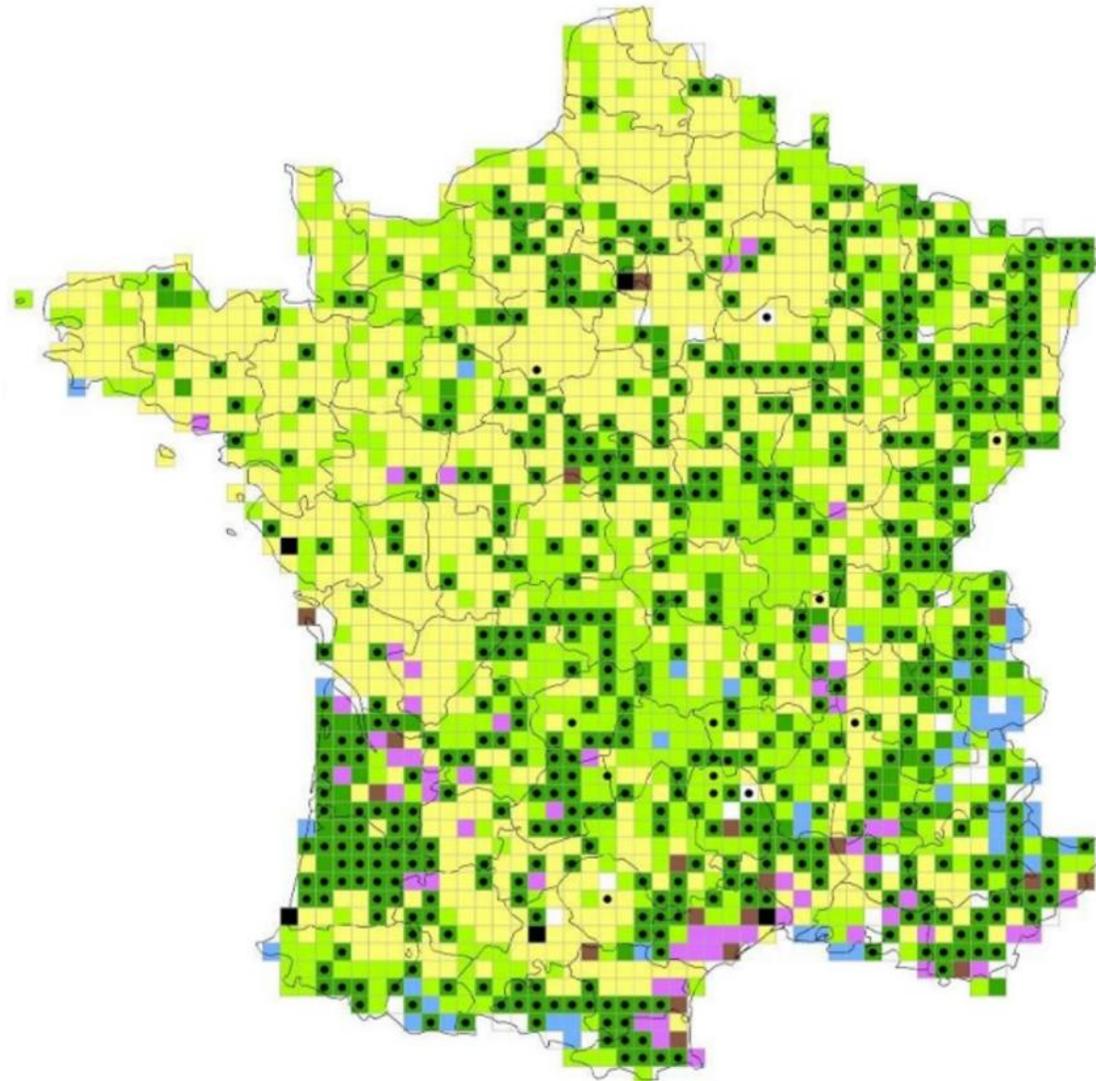
...auquel j'ai pu (infimement) participer !



Crédits photo : Didier Michot

Merci à Blandine Lemerrier, Didier Michot et Éric Beaucher !

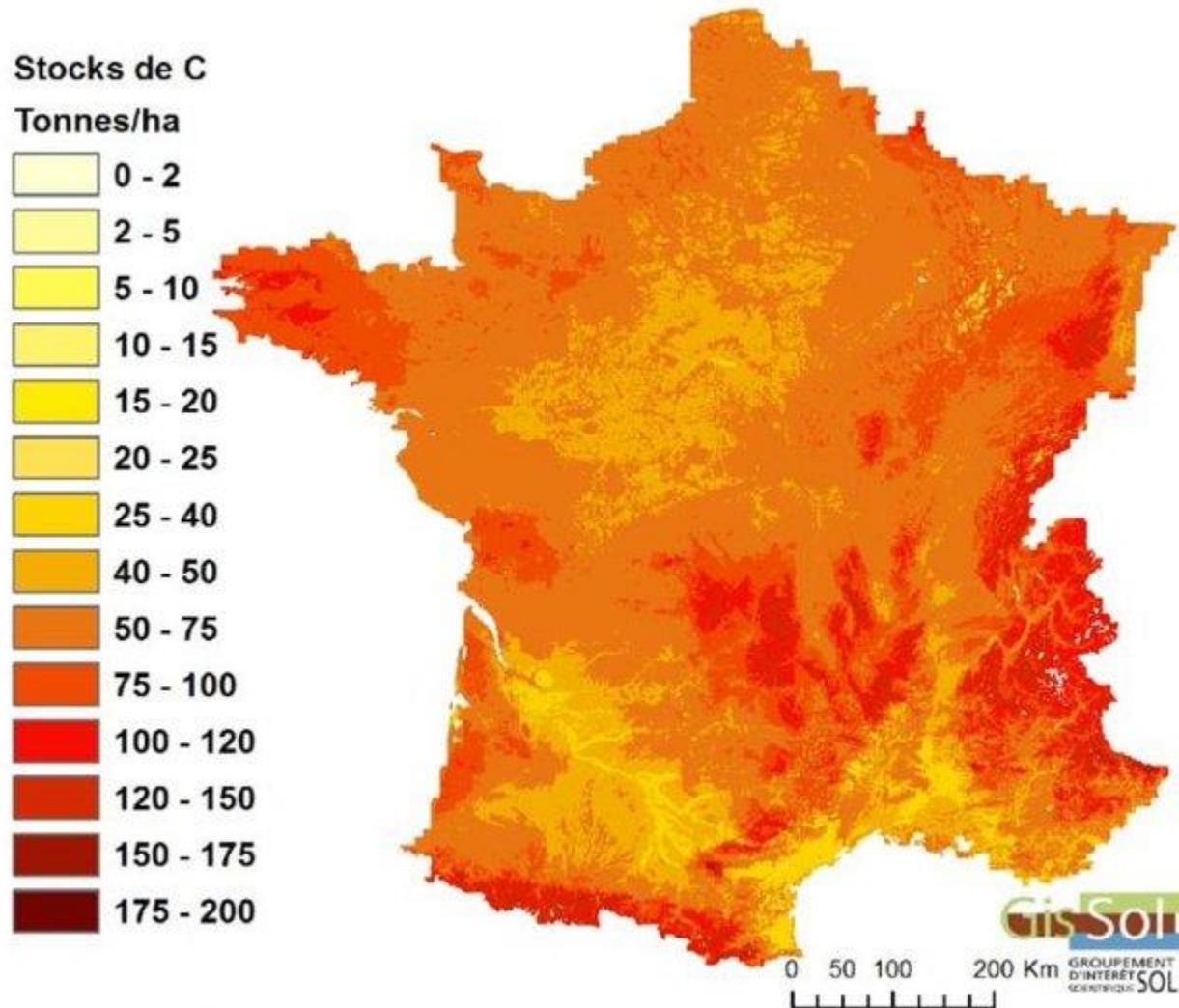
# Le RMQS de surface : sept occupations des sols



- Parcs et jardins [3]
- Successions culturales [785]
- Surfaces boisées [526]
- Surfaces toujours en herbe [481]
- Vignes, vergers et cultures pérennes arbustives [42]
- Milieus naturels particuliers [40]
- Friches [14]
- Non échantillonnés



# L'objectif : obtenir un état des lieux du COS à l'échelle du pays

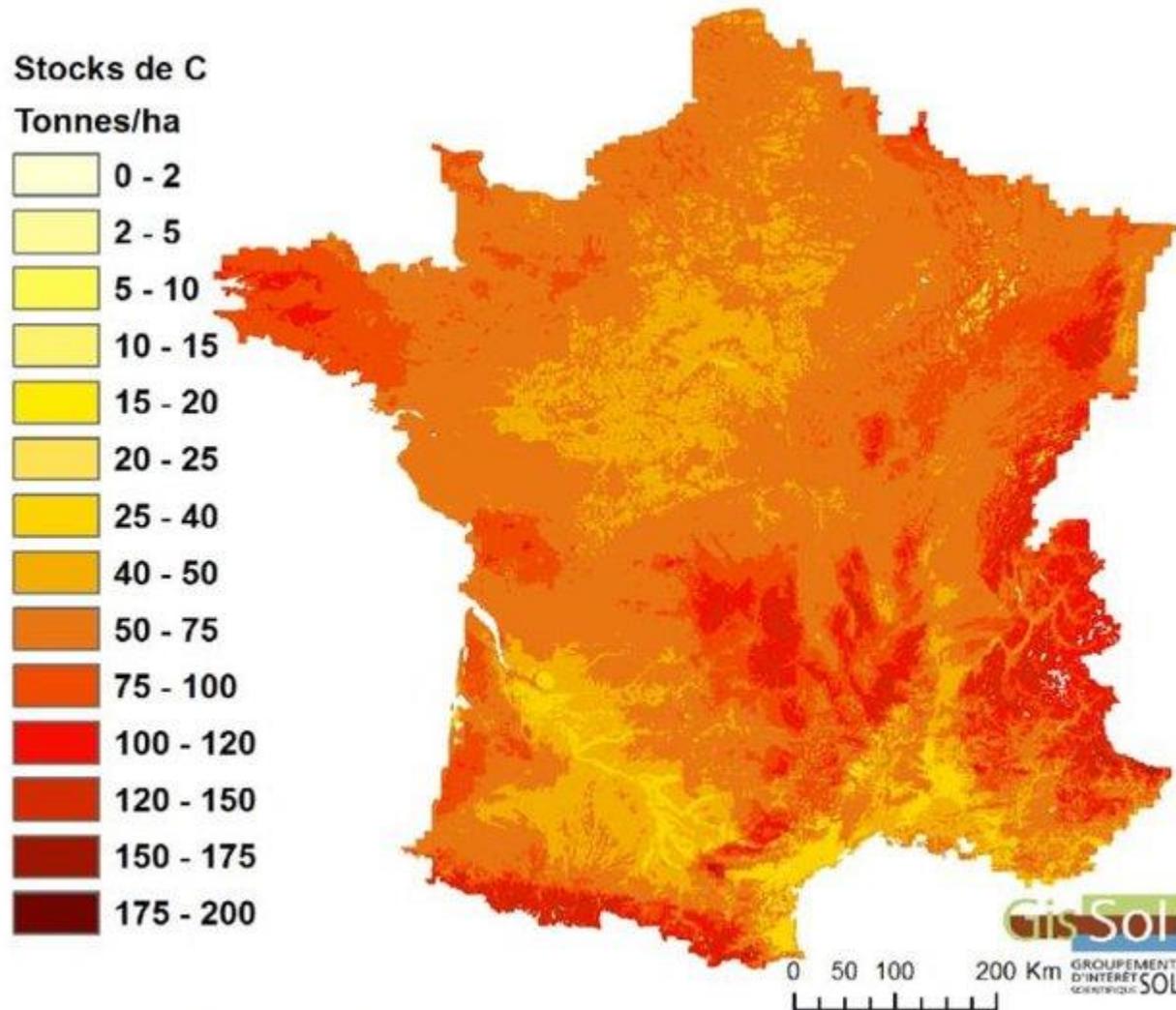


Source: Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017.

On connaît les stocks de COS à l'échelle du pays.

Oui mais... va-t-il y rester ? (Martin et al., 2011)

# L'objectif : obtenir un état des lieux du COS à l'échelle du pays



Source: Gis Sol, IGCS-RMQS, Inra 2017.

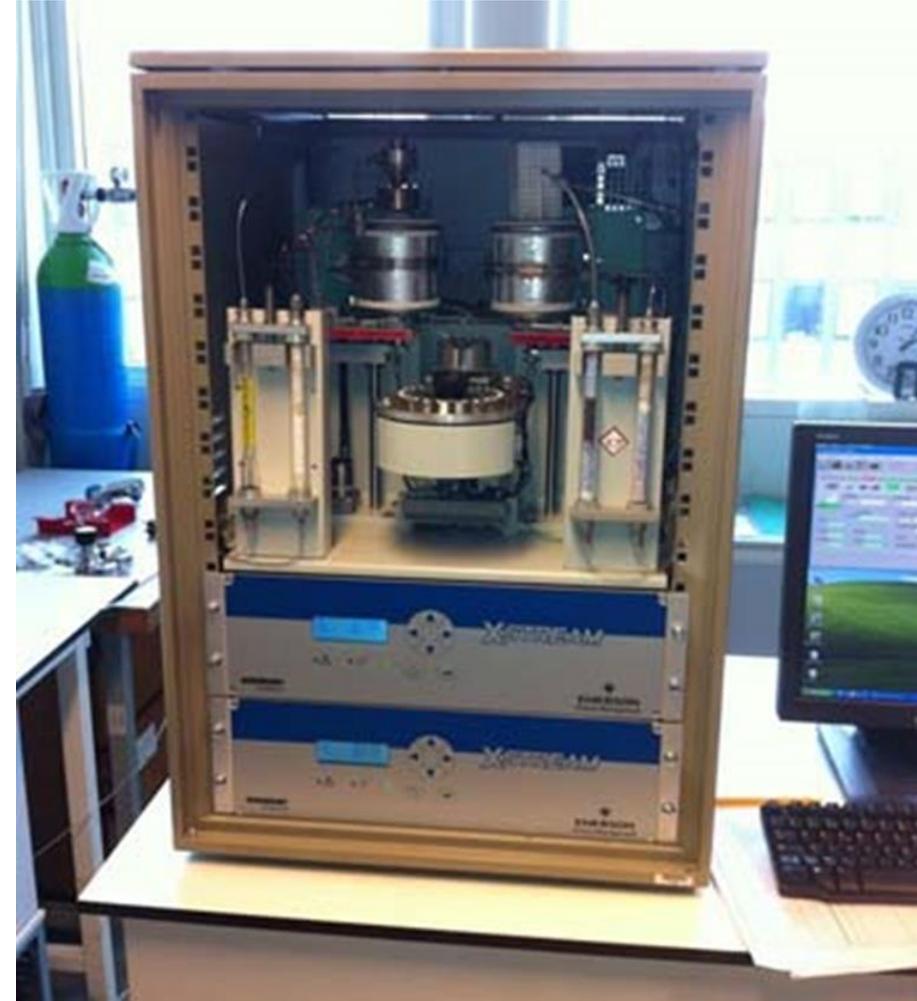
On connaît les stocks de COS à l'échelle du pays.

Oui mais... va-t-il y rester ? (Martin et al., 2011)

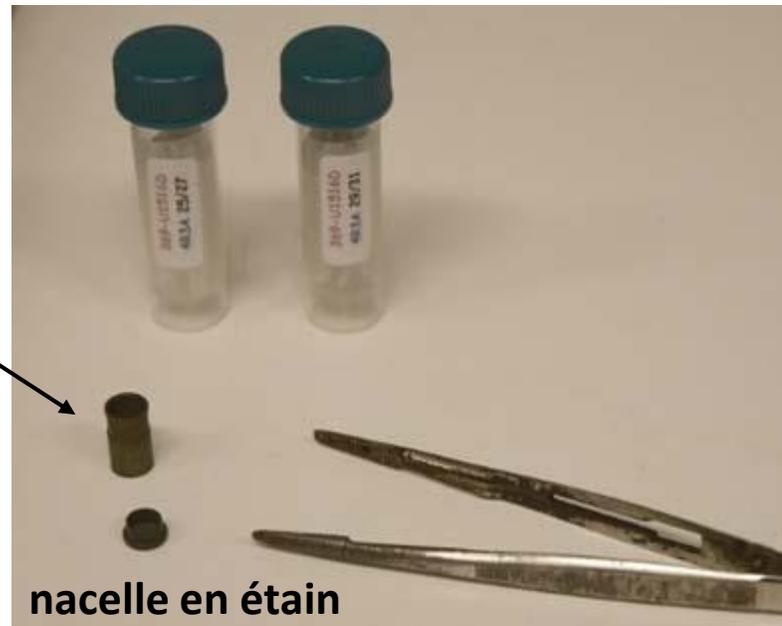
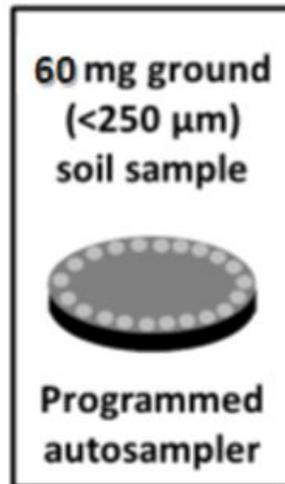
→ On cherche à obtenir une estimation de la stabilité biogéochimique du COS grâce à des **indicateurs stœchiométriques** et des **indicateurs de stabilité thermique**

# Les méthodes thermiques : le suivi des gaz générés ; focus sur l'analyse thermique Rock-Eval®

Le suivi des gaz générés consiste à mesurer les quantités de différents gaz (effluents de pyrolyse, CO, CO<sub>2</sub> par exemple) lors de phases de chauffage (pyrolyse et/ou oxydation).

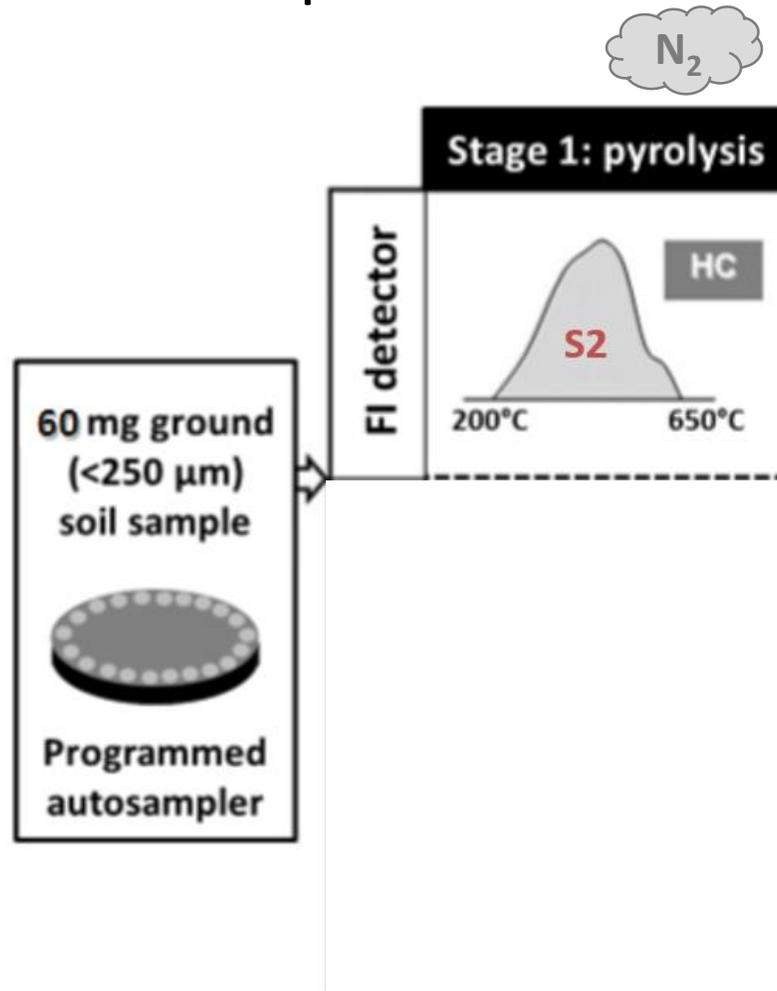


# La Rock-Eval<sup>®</sup> : deux phases de chauffage de l'échantillon

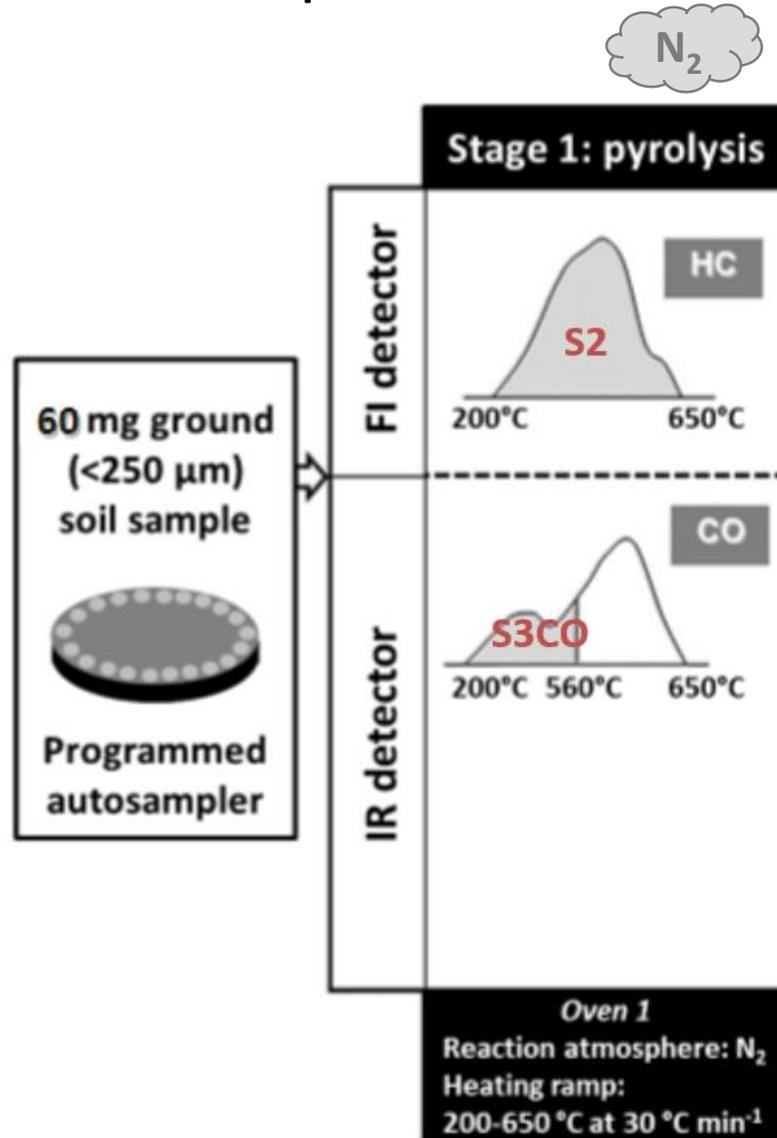


Crédits photo : François Baudin.

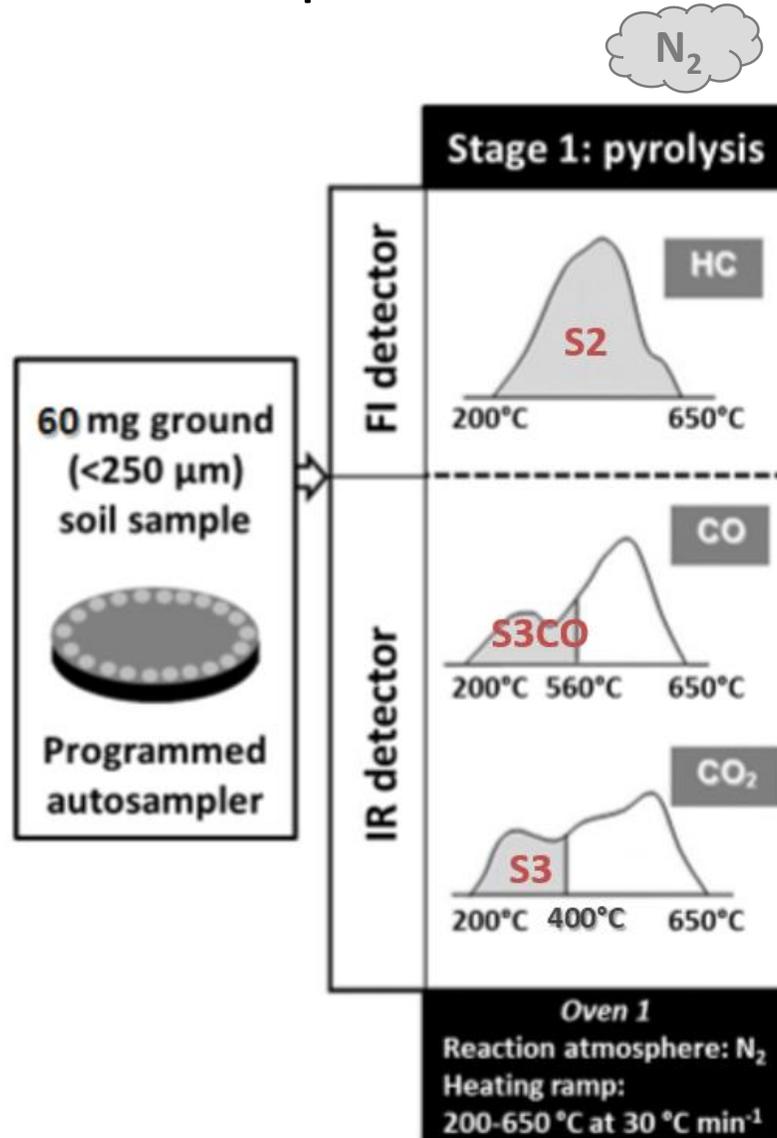
# La Rock-Eval<sup>®</sup> : deux phases de chauffage de l'échantillon



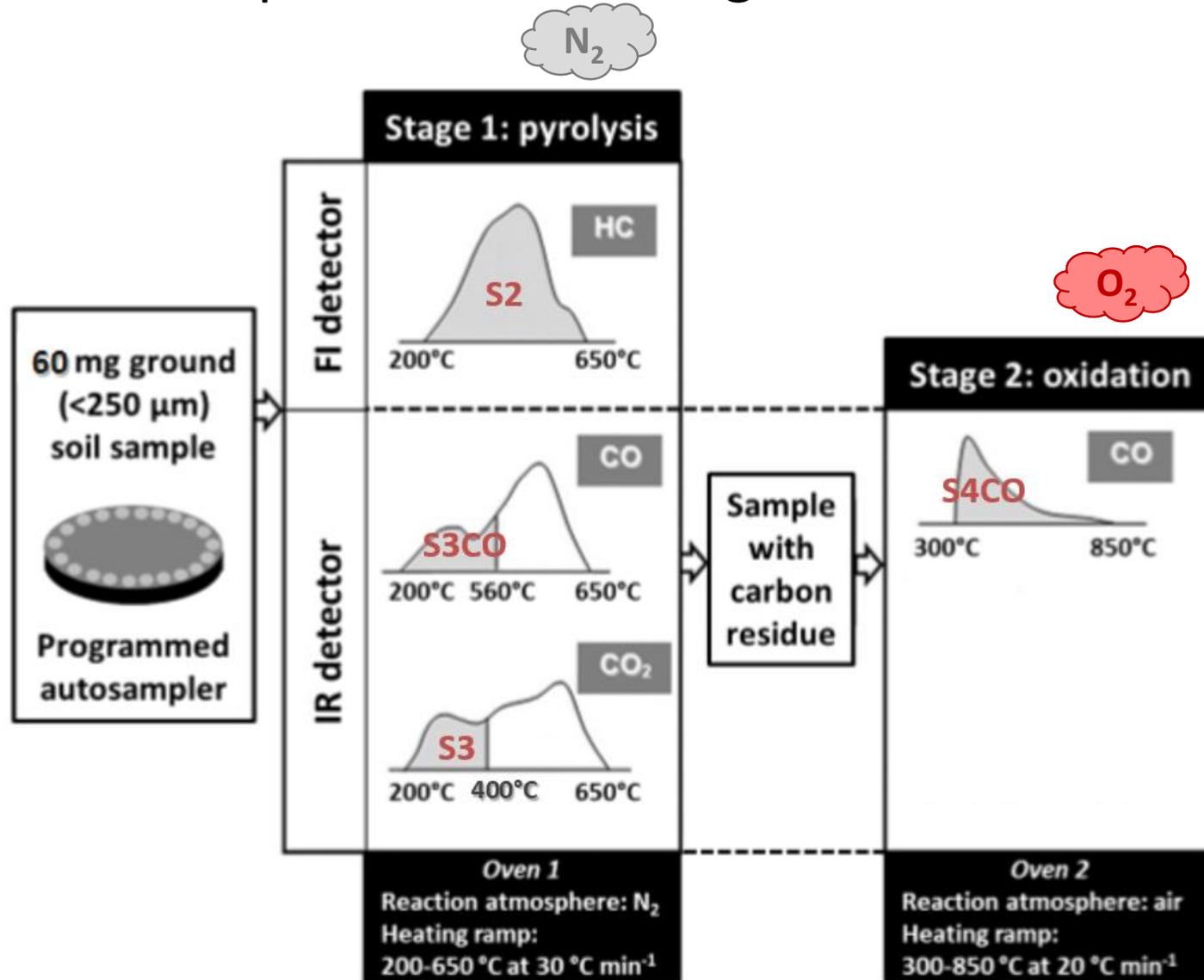
# La Rock-Eval<sup>®</sup> : deux phases de chauffage de l'échantillon



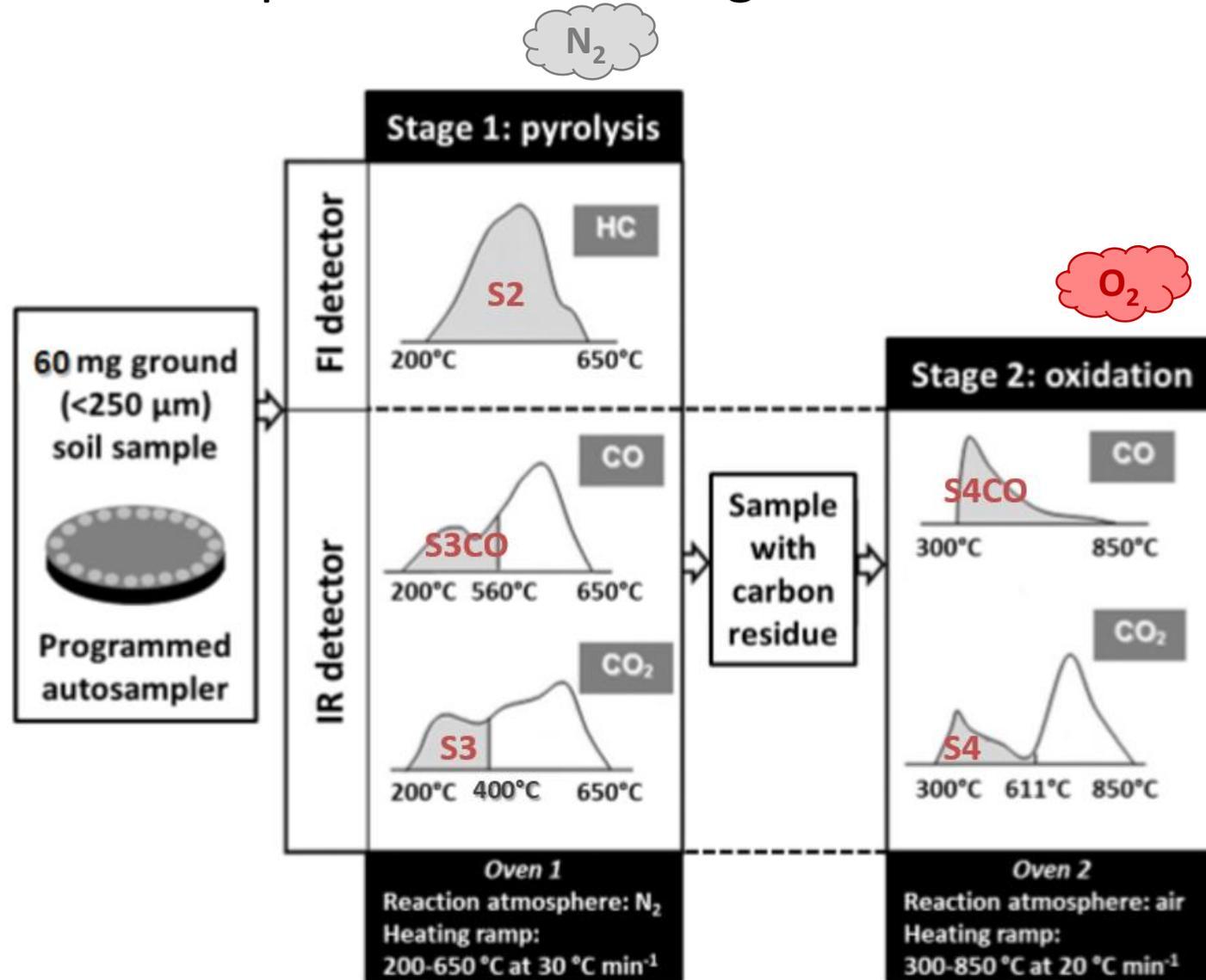
# La Rock-Eval<sup>®</sup> : deux phases de chauffage de l'échantillon



# La Rock-Eval<sup>®</sup> : deux phases de chauffage de l'échantillon

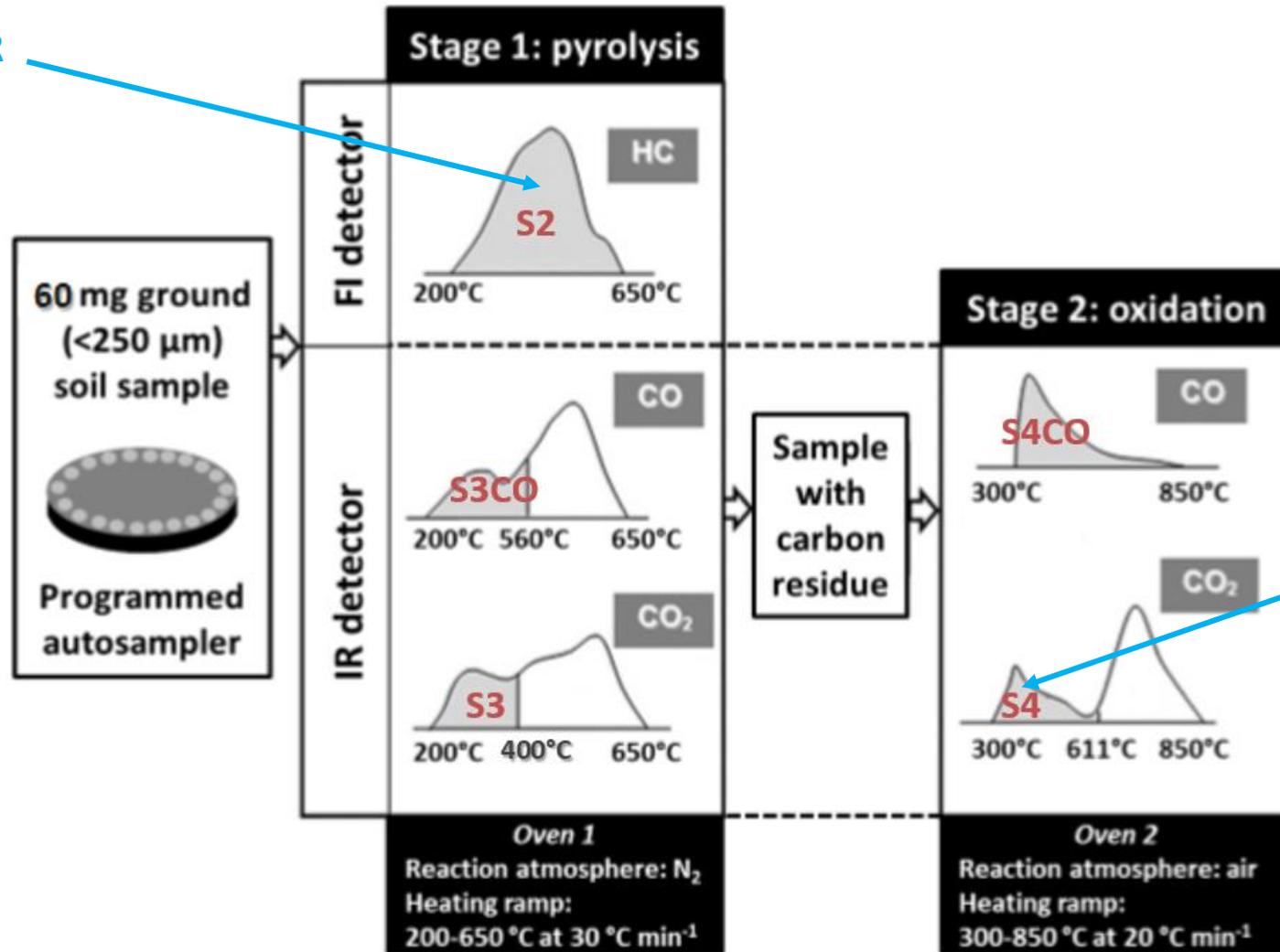


# La Rock-Eval<sup>®</sup> : deux phases de chauffage de l'échantillon



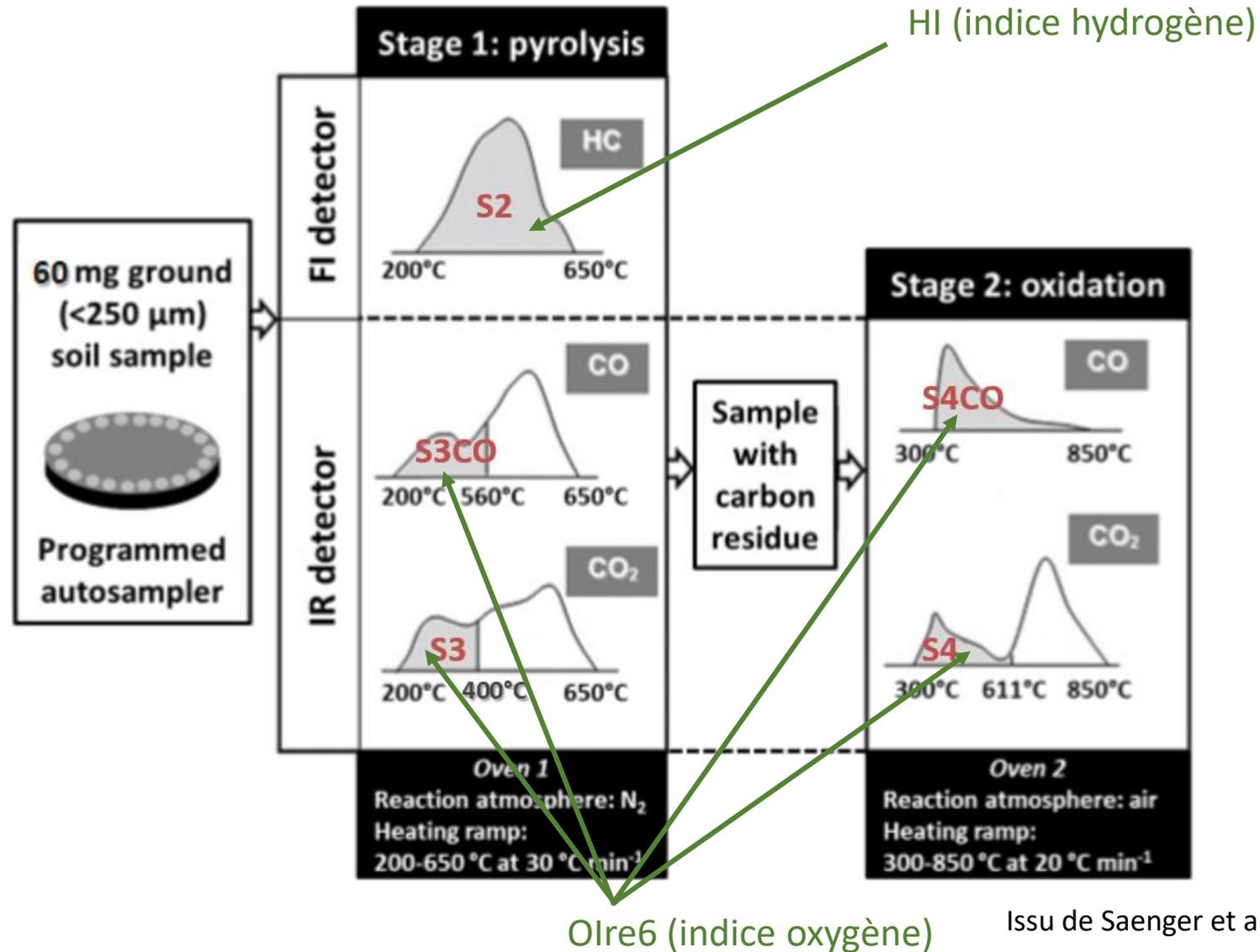
Pour cela, des indicateurs de stabilité thermique...

T90\_HC\_PYR



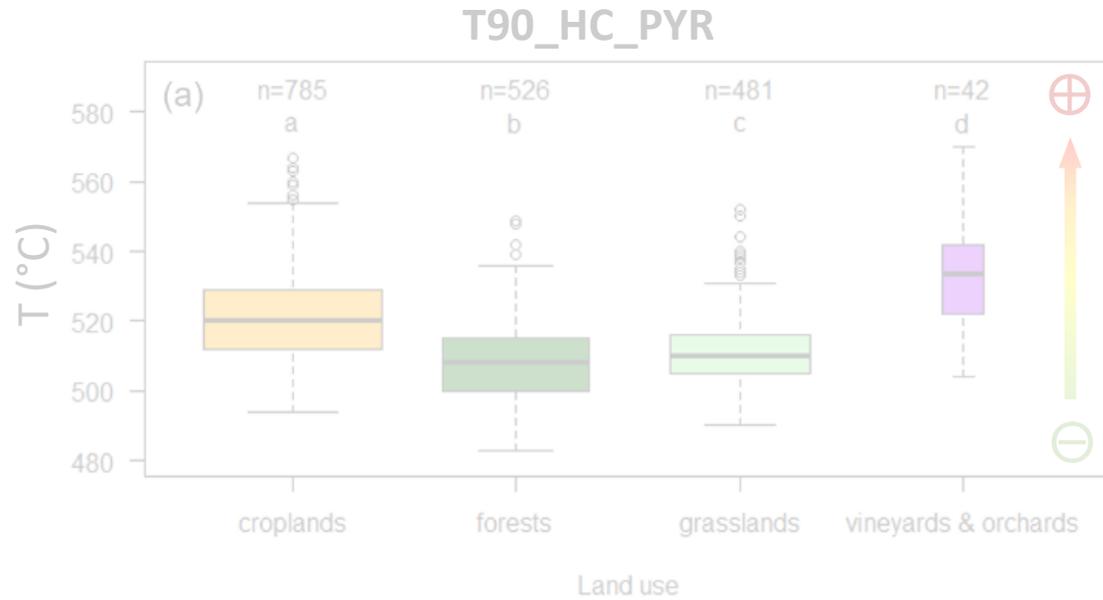
T50\_CO2\_OX

...et des indicateurs de stœchiométrie



Issu de Saenger et al. (2013), modifié.

# Résultats : des indicateurs de stabilité thermique plus ou moins attendus

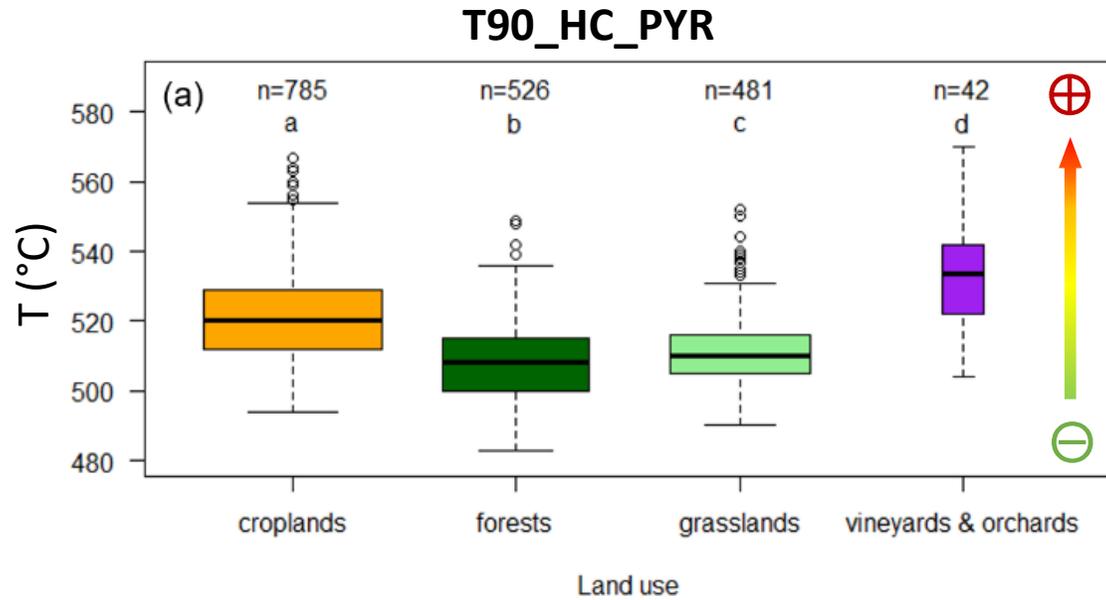


⊕ stable d'après les indicateurs RE

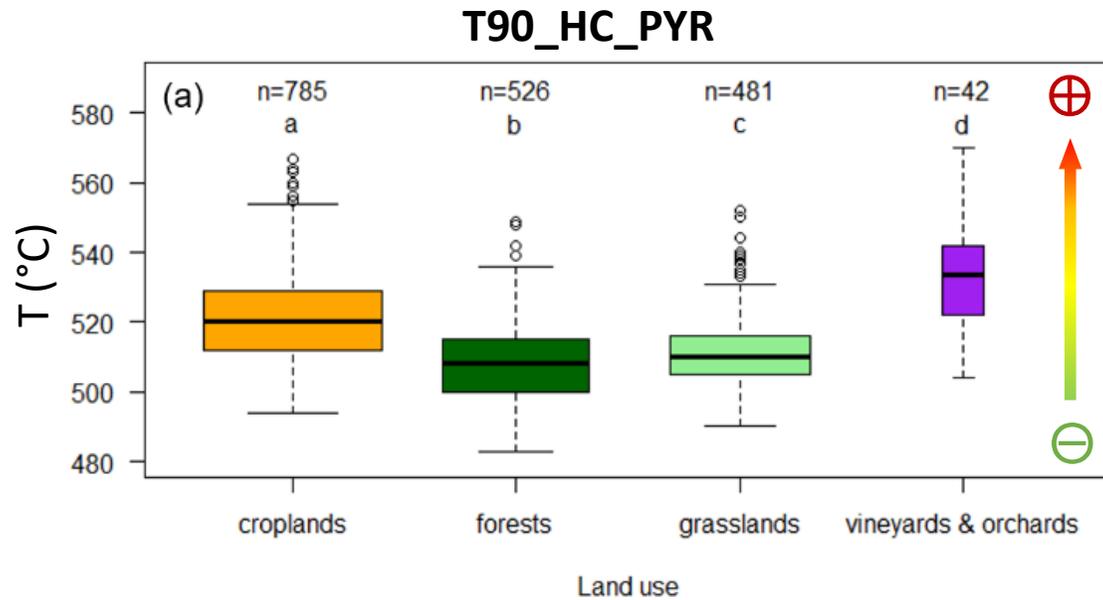


⊖ stable d'après les indicateurs RE

# Résultats : des indicateurs de stabilité thermique plus ou moins attendus



# Résultats : des indicateurs de stabilité thermique plus ou moins attendus

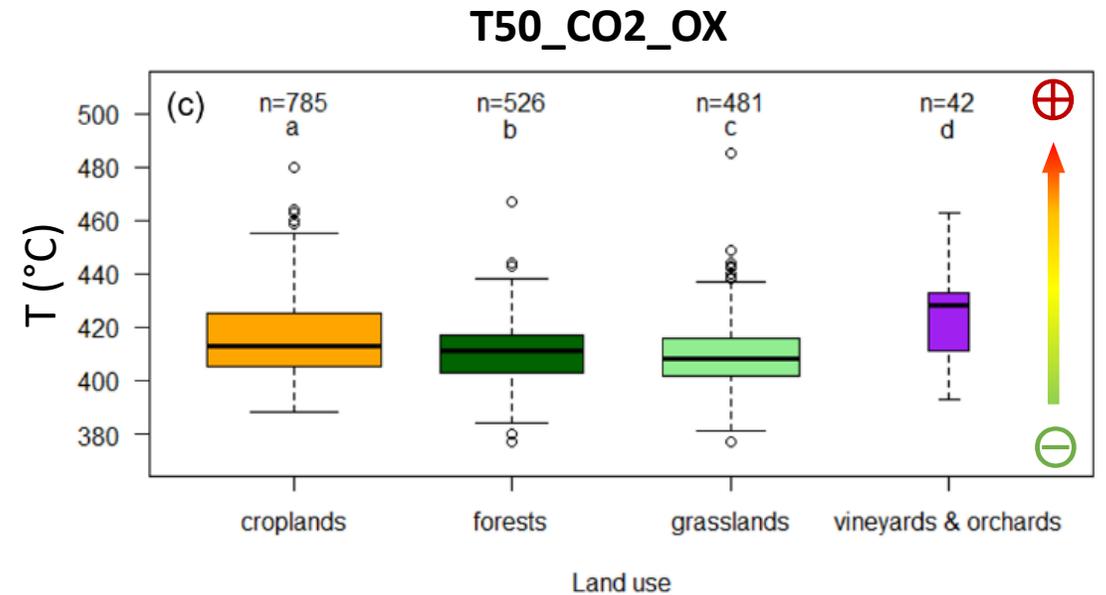
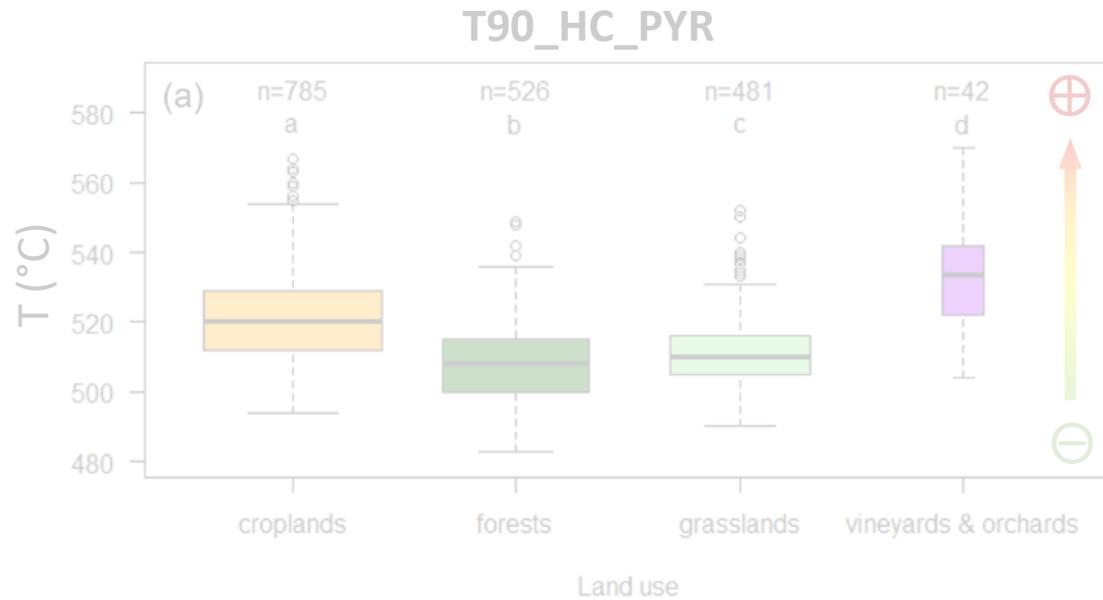


→ Des valeurs différentes selon les usages

→ MO plus stable thermiquement dans les grandes cultures et les vignes

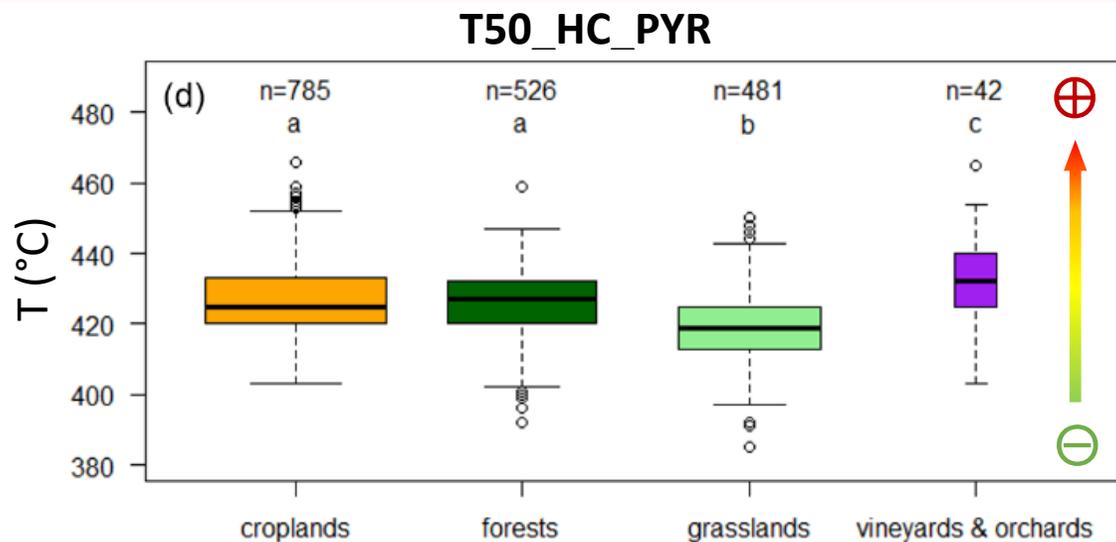
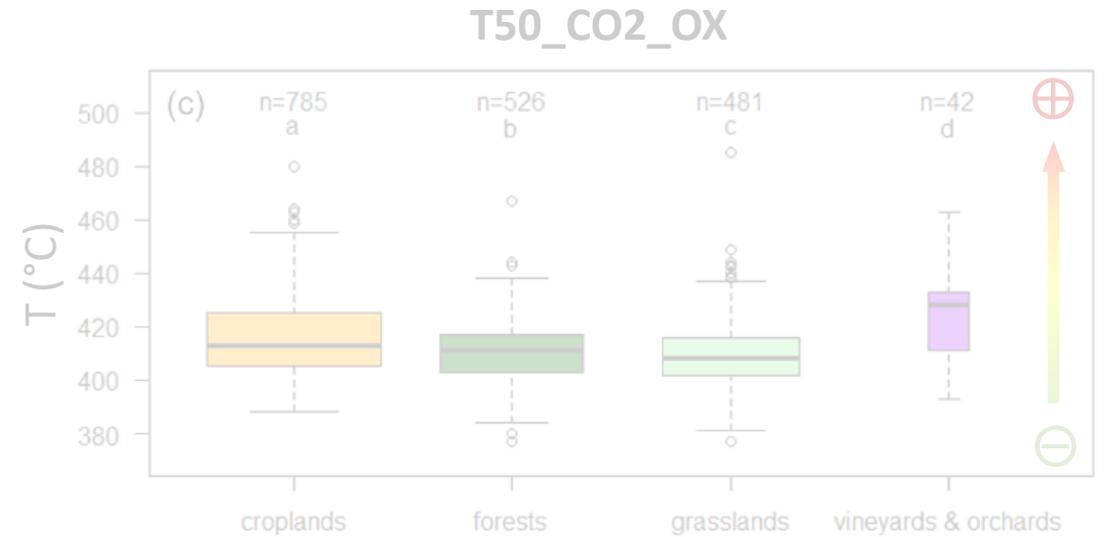
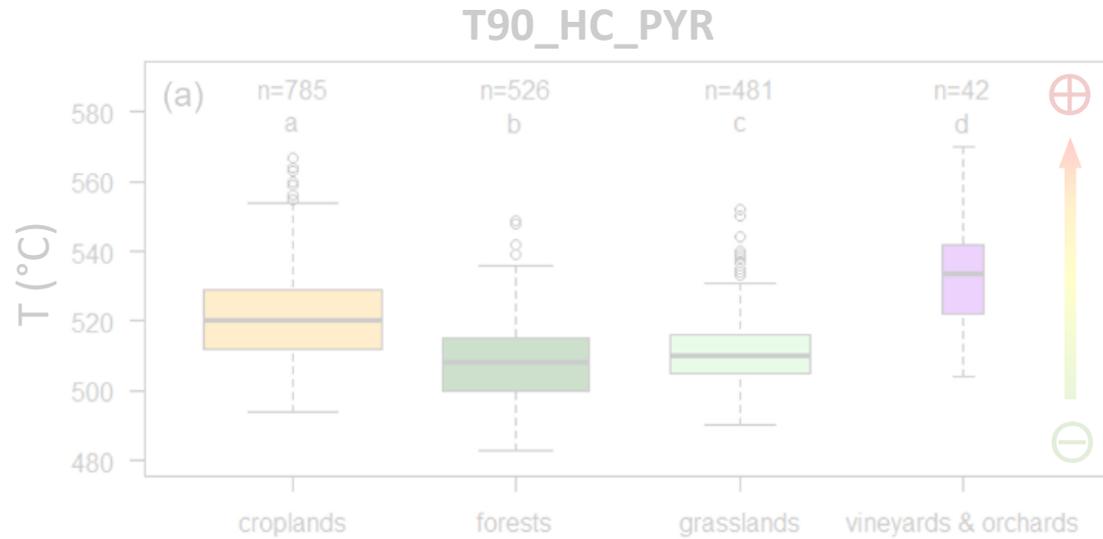
→ De manière cohérente avec les caractéristiques de chaque occupation

# Résultats : des indicateurs de stabilité thermique plus ou moins attendus



- Des valeurs différentes selon les usages
- **MO plus stable thermiquement dans les grandes cultures et les vignes**
- De manière cohérente avec les caractéristiques de chaque occupation

# Résultats : des indicateurs de stabilité thermique plus ou moins attendus



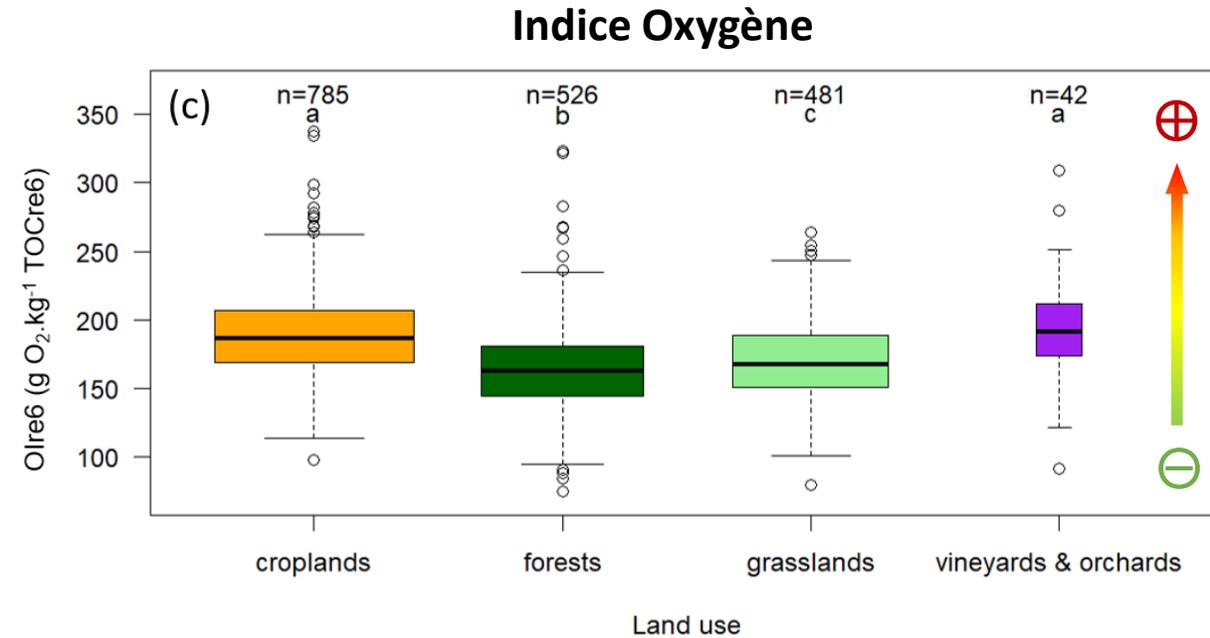
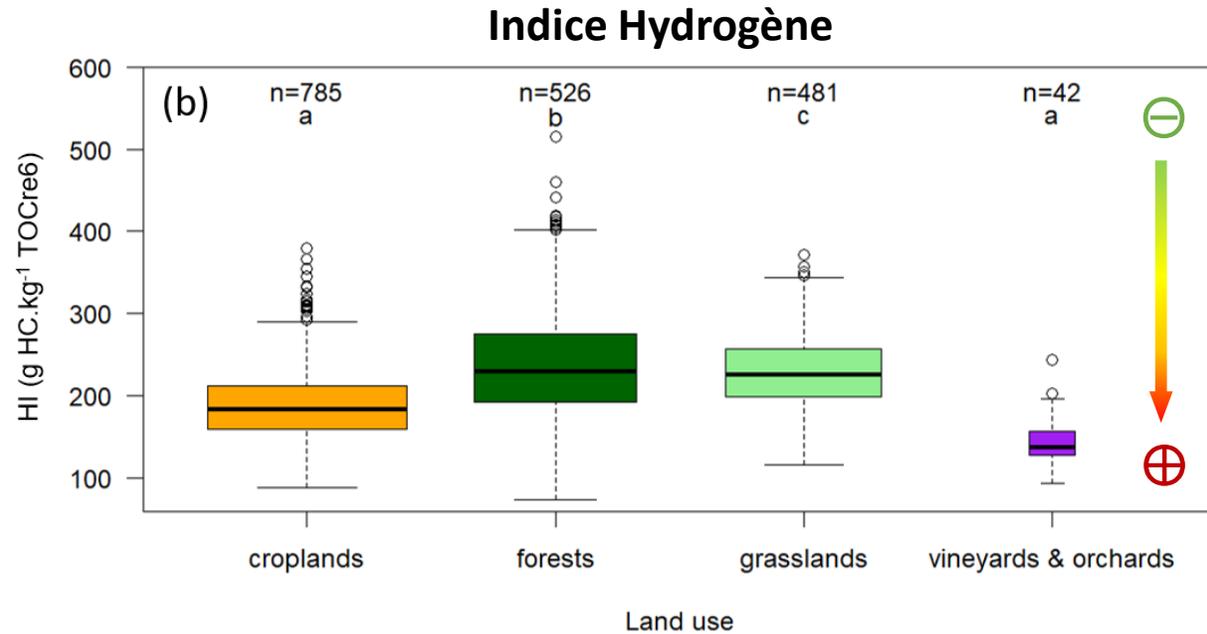
→ Des valeurs différentes selon les usages

→ MO aussi stable thermiquement dans les forêts que les grandes cultures ?

→ De manière NON cohérente avec les caractéristiques de chaque occupation

→ Certains indicateurs RE semblent mal corrélés à la stabilité biogéochimique (= note négative au Ch. I ?)

# Résultats : des indicateurs stœchiométriques utiles



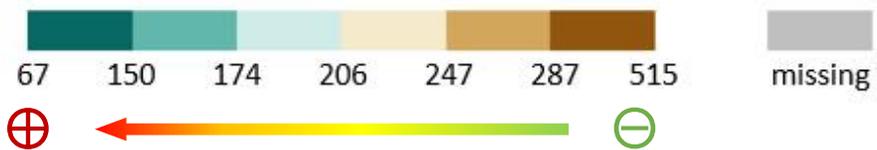
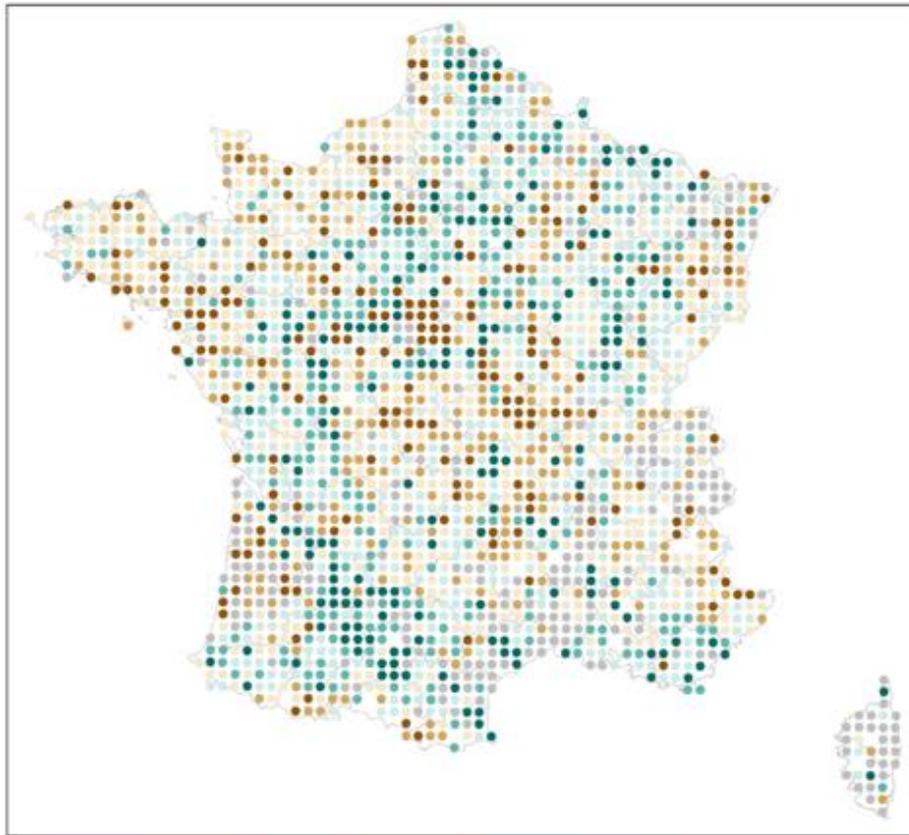
→ Des valeurs différentes selon les usages

→ MO moins stable, moins oxydée et plus hydrogénée dans les prairies et forêts

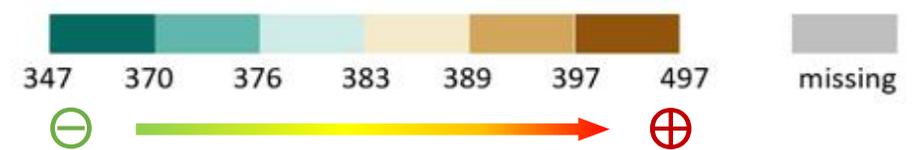
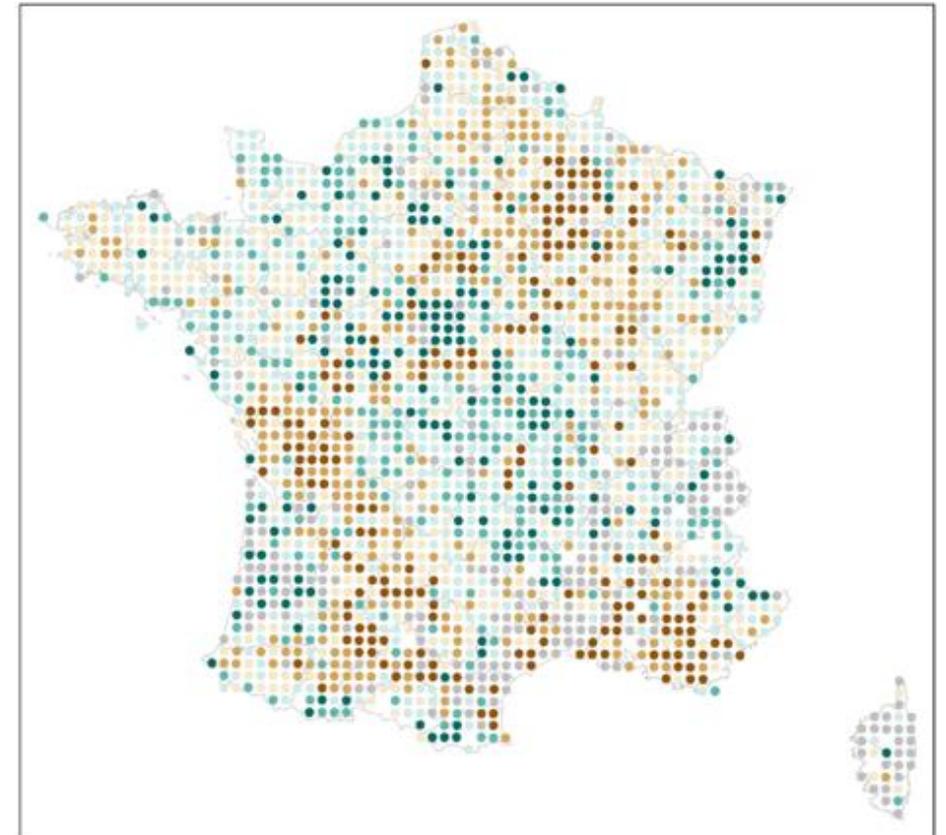
→ De manière cohérente avec les caractéristiques de chaque occupation

# Une cohérence à l'échelle du pays

## Indice Hydrogène



## T50\_CO2\_PYR





# Au-delà des résultats, une validation de la preuve de concept !

- 2 037 échantillons analysés en 6 mois.
- Merci à François Baudin et Florence Savignac d'avoir rendu ce travail possible !



→ Au-delà de ces indicateurs, quels résultats donne un fractionnement thermique comparativement au fractionnement physique POM/MAOM ?

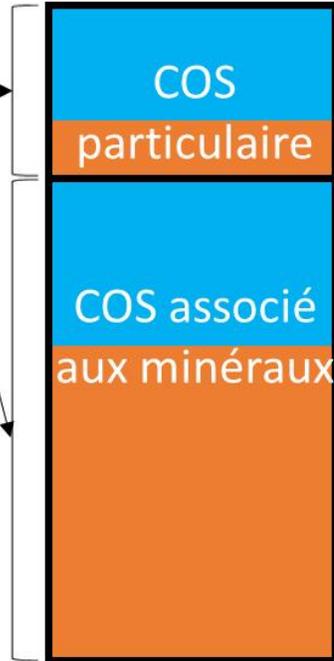
## Partie III

Étude de la complémentarité des fractions  
thermiques et physiques du carbone organique  
du sol

# Le fractionnement physique POM/MAOM



Fractionnement  
granulométrique  
(1200 sites RMQS)



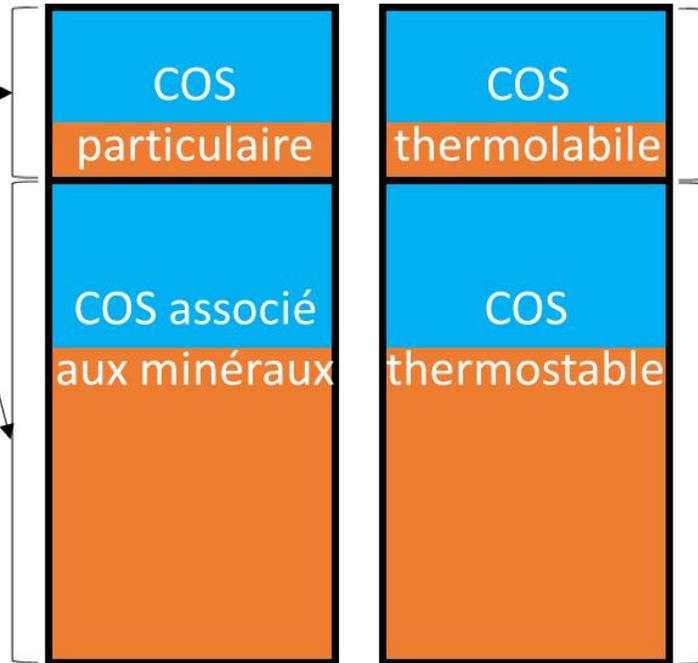
■ COS<sub>actif</sub> (à l'échelle du siècle)

■ COS<sub>stable</sub> (à l'échelle du siècle)

# Au-delà des indicateurs thermiques : le modèle PARTY<sub>SOC</sub>



Fractionnement  
granulométrique  
(1200 sites RMQS)



Rock-Eval®  
(tous sites RMQS)

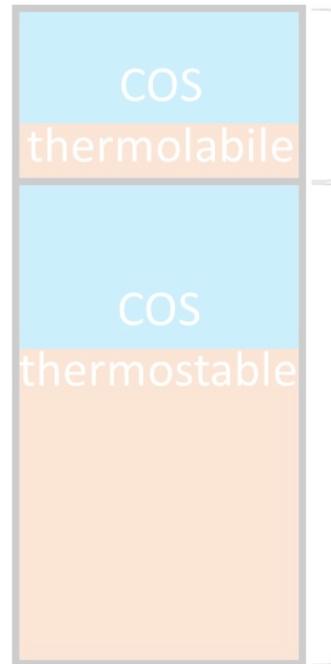
■ COS<sub>actif</sub> (à l'échelle du siècle)

■ COS<sub>stable</sub> (à l'échelle du siècle)

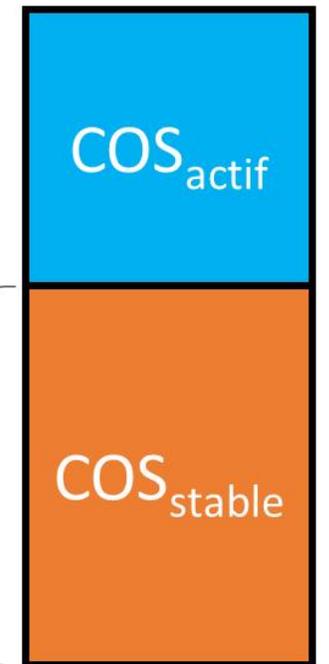
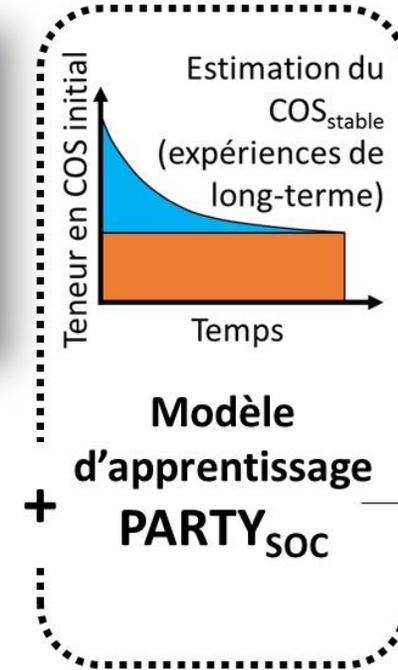
# Au-delà des indicateurs thermiques : le modèle PARTY<sub>SOC</sub>



Fractionnement granulométrique  
(1200 sites RMQS)



Rock-Eval®  
(tous sites RMQS)



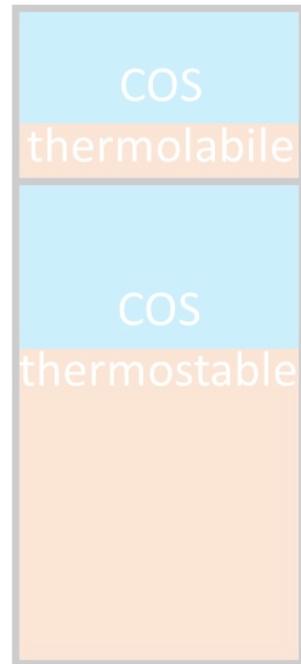
■ COS<sub>actif</sub> (à l'échelle du siècle)

■ COS<sub>stable</sub> (à l'échelle du siècle)

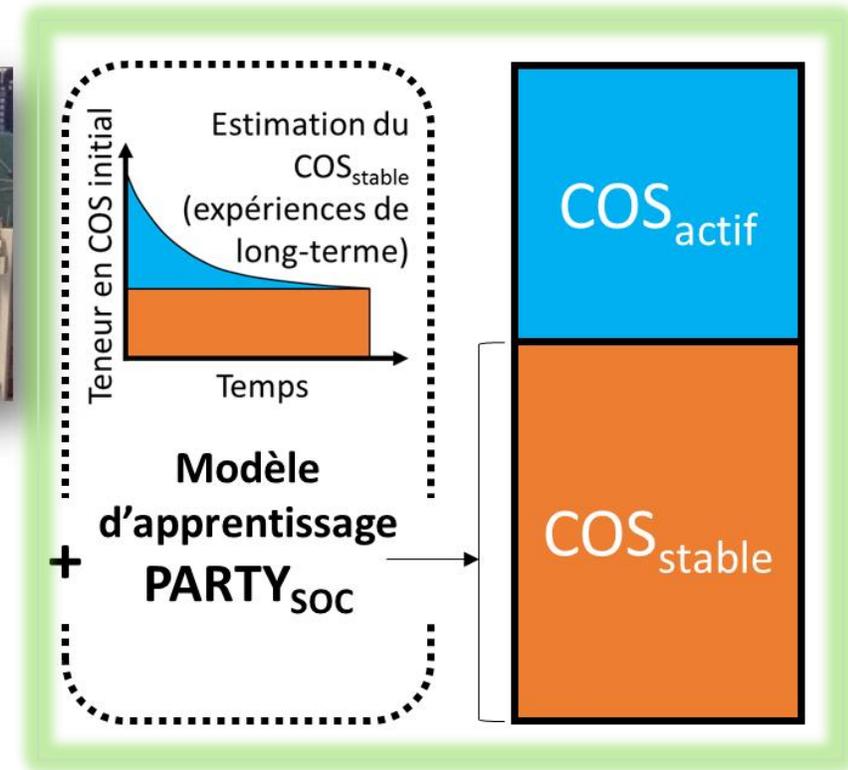
# Au-delà des indicateurs thermiques : le modèle PARTY<sub>SOC</sub>



Fractionnement granulométrique  
(1200 sites RMQS)



Rock-Eval®  
(tous sites RMQS)

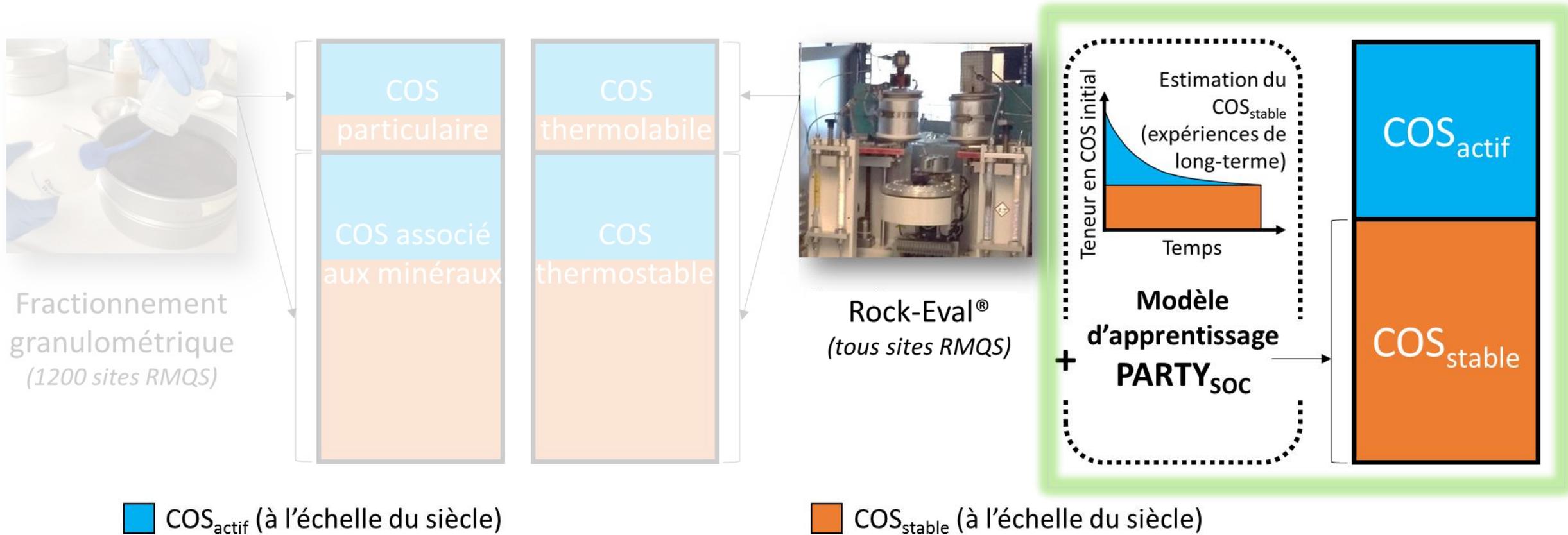


■ COS<sub>actif</sub> (à l'échelle du siècle)

■ COS<sub>stable</sub> (à l'échelle du siècle)

Validé sur les jachères nues de longue durée !

# Au-delà des indicateurs thermiques : le modèle PARTY<sub>SOC</sub>



Validité étendue aux grandes cultures en France métropolitaine (Kanari et al., 2022) !

Ces deux méthodes fournissent-elles des résultats identiques ?



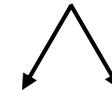
**POC**



**MAOC**



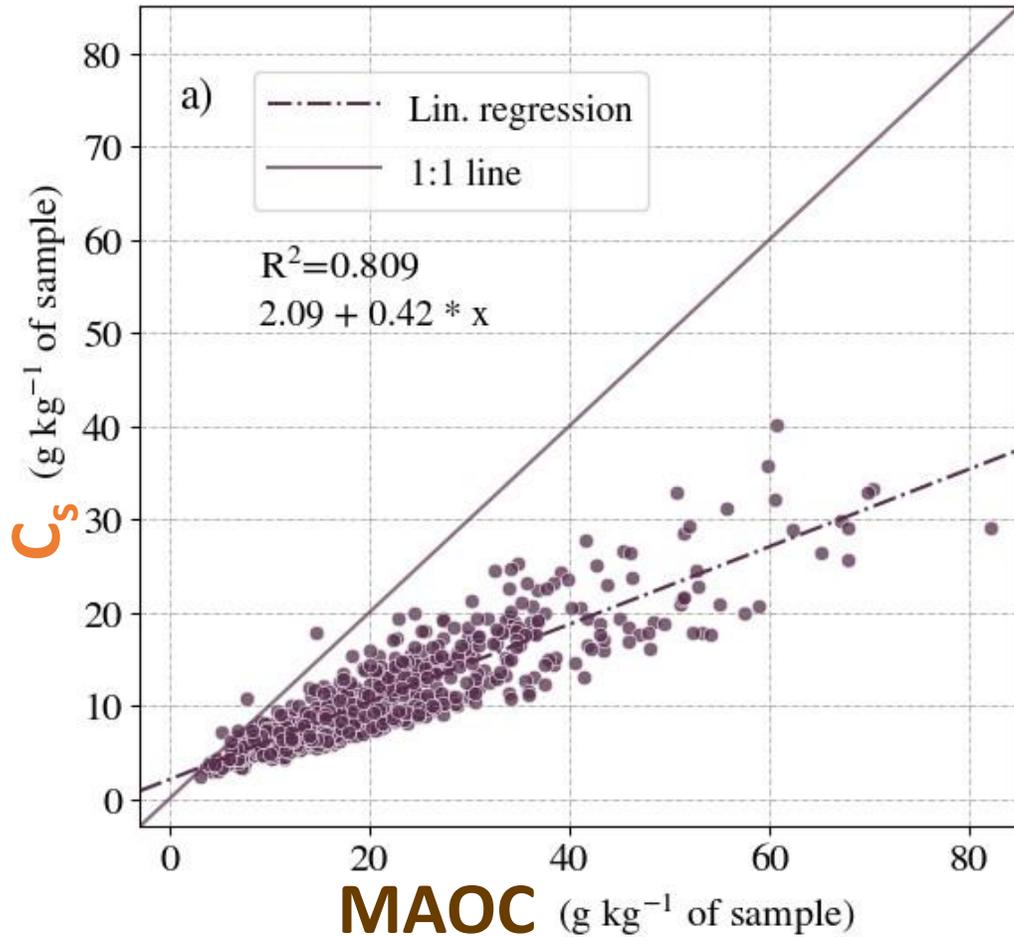
**C<sub>a</sub>**



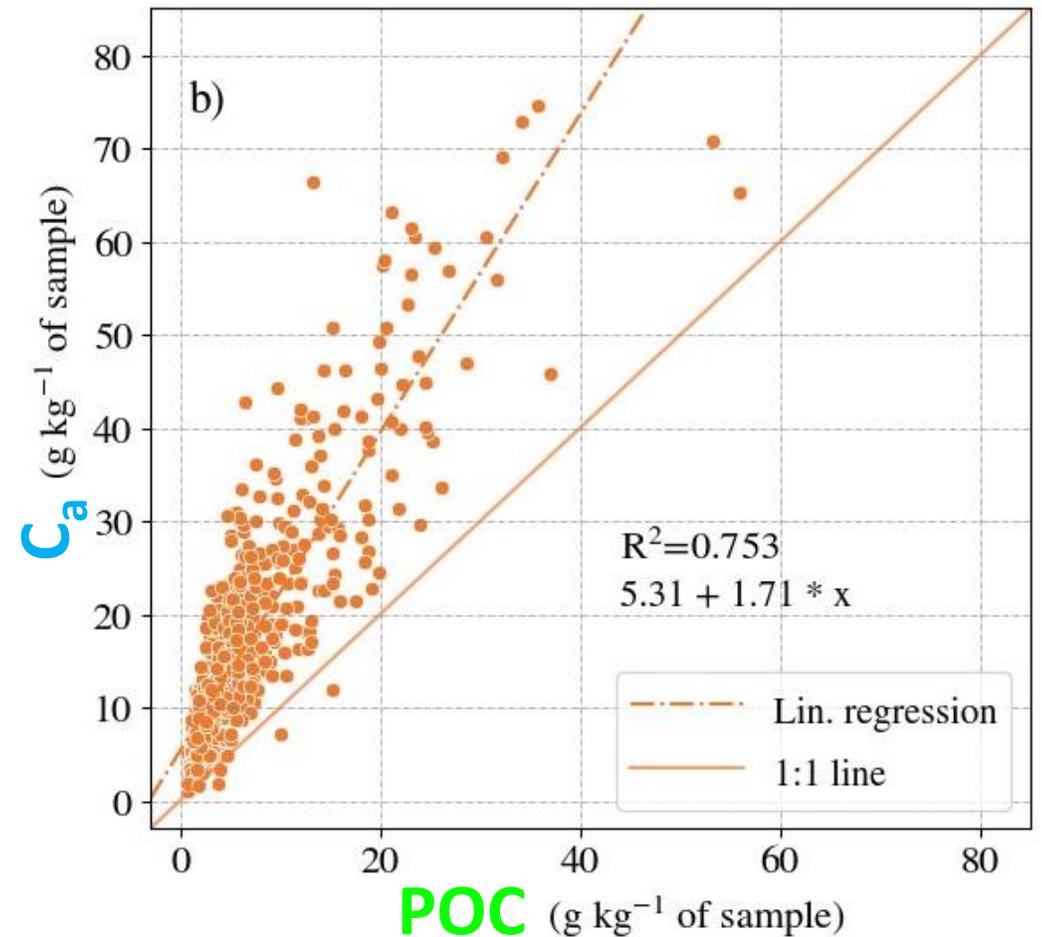
**C<sub>s</sub>**

# Des compartiments de taille différente

Comparaison des compartiments **stables** de PARTY<sub>SOC</sub> et du fractionnement physique



Comparaison des compartiments **actifs** de PARTY<sub>SOC</sub> et du fractionnement physique



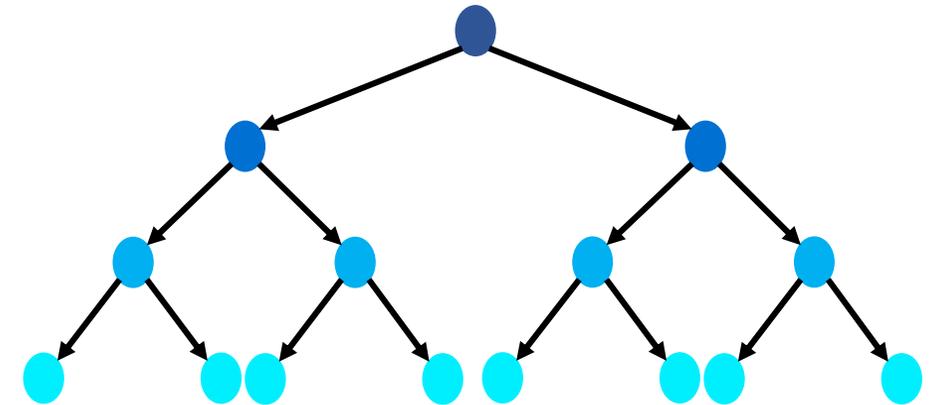
# Le modèle Random Forest

Données avec liste de paramètres :

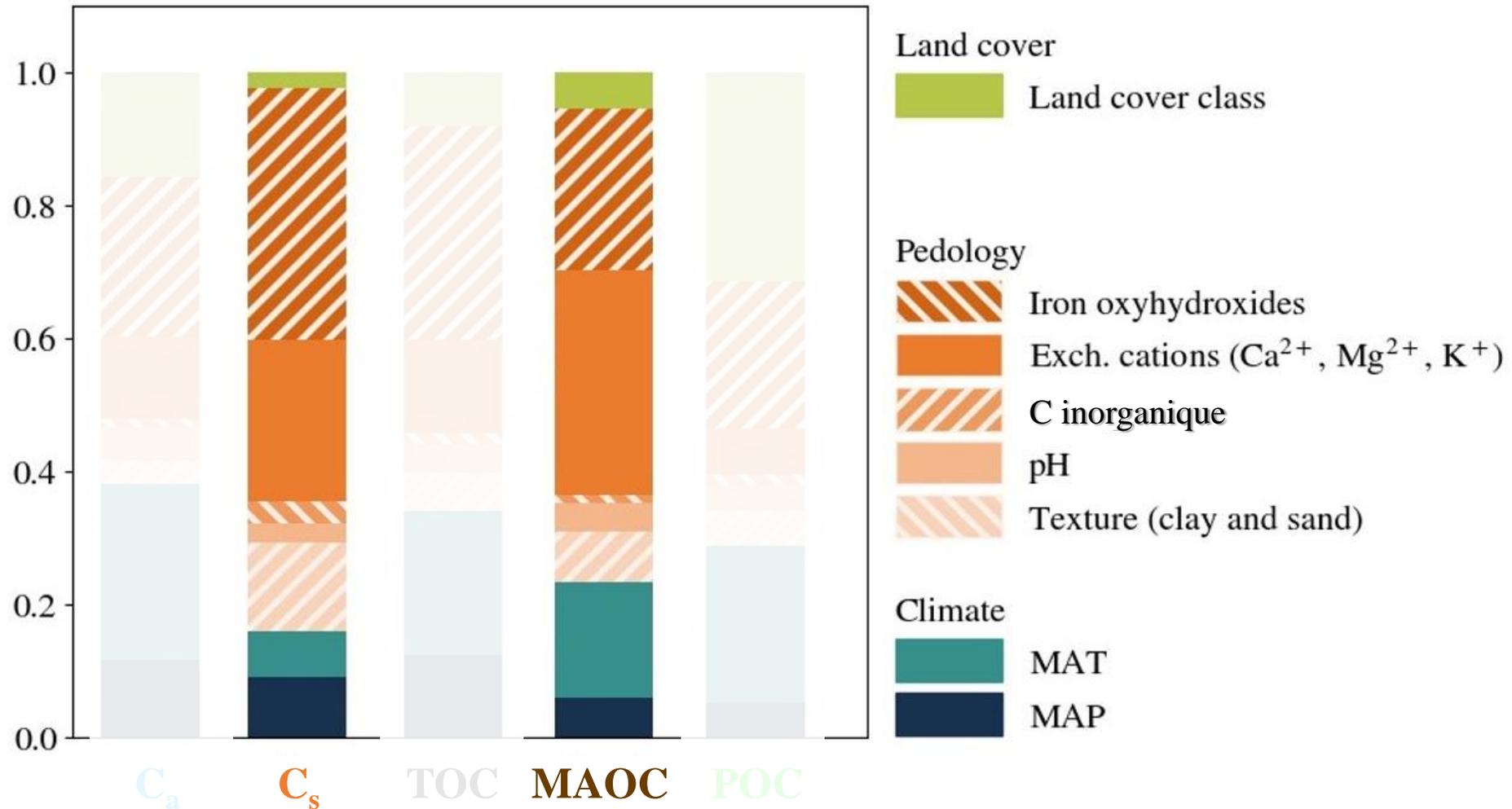
- Pédologie : Oxyhydroxydes de fer, cations échangeables majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ),  $\text{C}_{\text{inorg}}$ , pH, texture (argile et sable)
- Climat : température annuelle moyenne (MAT) et précipitations annuelles moyennes (MAP)
- Couvert végétal : grandes cultures, forêts, prairies, vignes

Variables d'intérêt :

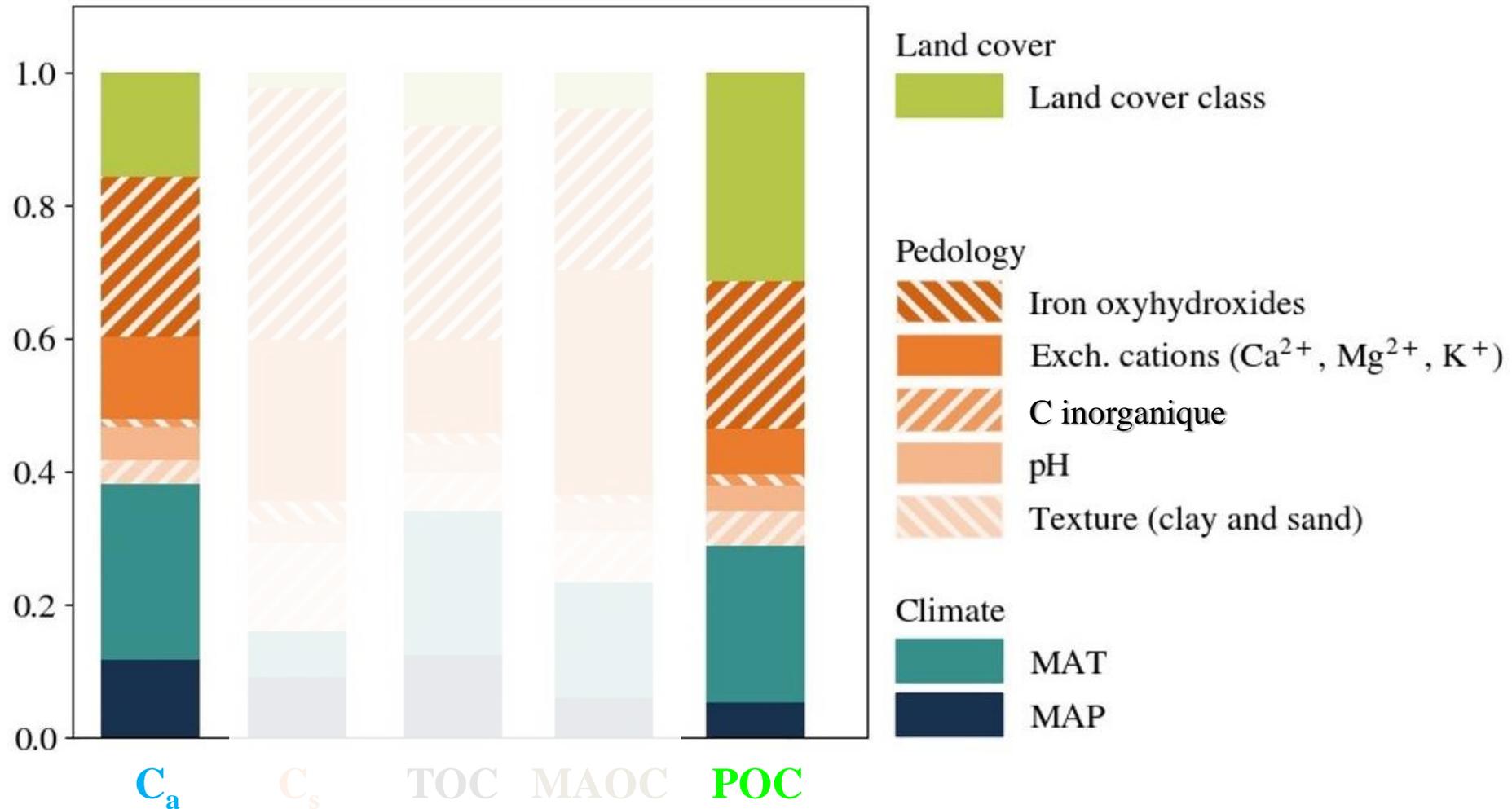
- Carbone stable à l'échelle du siècle ( $\text{PARTY}_{\text{SOC}}$ )
- Carbone actif à l'échelle du siècle ( $\text{PARTY}_{\text{SOC}}$ )
- Carbone organique particulaire (fraction physique)
- Carbone organique associé aux minéraux (fraction physique)
- Carbone organique total



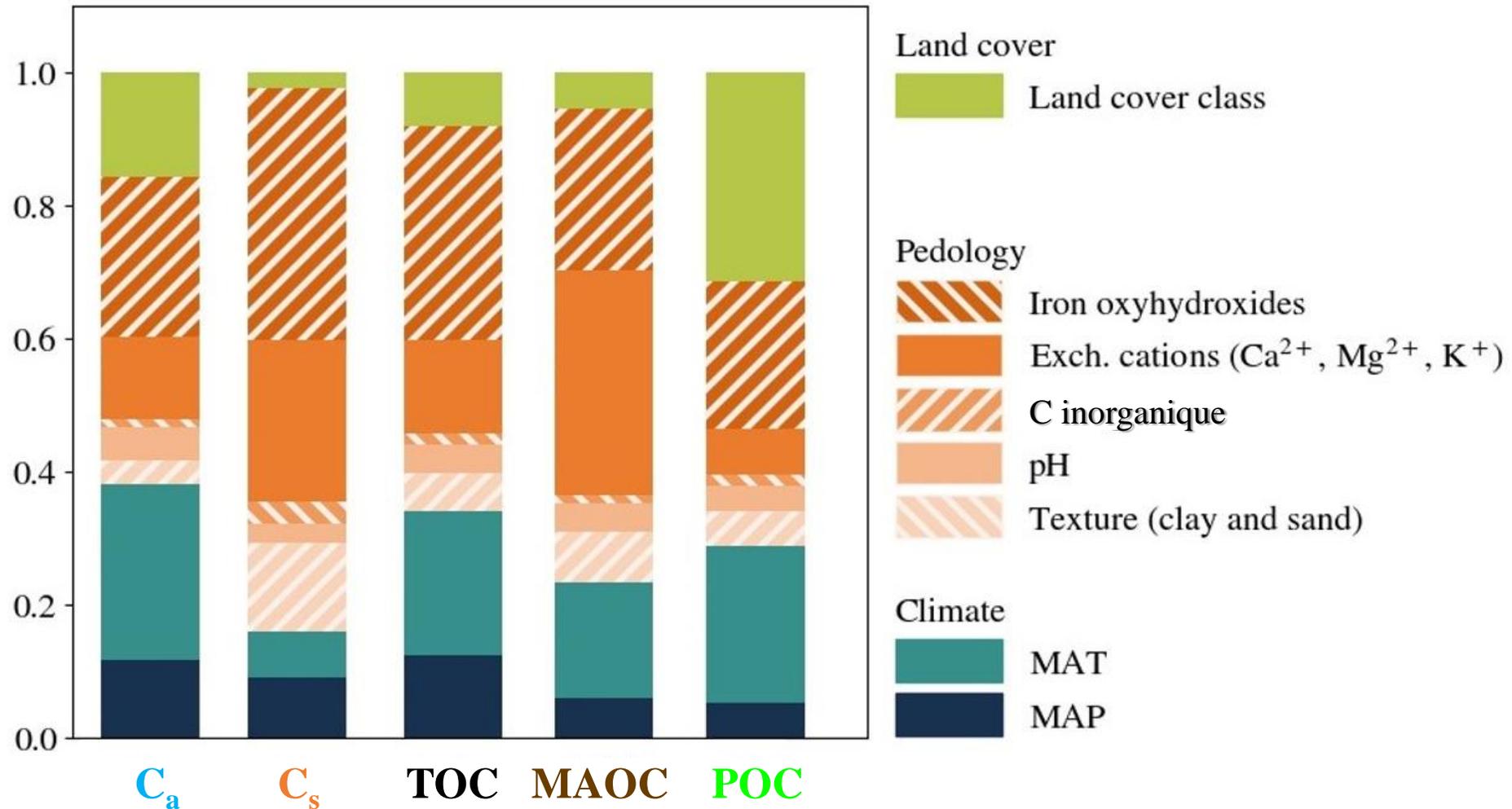
# Des déterminants environnementaux différents selon les compartiments



# Des déterminants environnementaux différents selon les compartiments



# Des déterminants environnementaux différents selon les compartiments



# Des fractionnements complémentaires

- Intérêt majeur du fractionnement  $PARTY_{SOC}$  par rapport à POM/MAOM : fractionné par MRT
- La taille des compartiments est différente
- Les déterminants sont similaires entre  $C_s$  et MAOC, et entre  $C_a$  et POC
- Les compartiments stables sont plutôt déterminés par les caractéristiques du sol tandis que les compartiments actifs sont déterminés par les entrées de C (= production primaire → climat + usage)

# Des fractionnements complémentaires

- Intérêt majeur du fractionnement  $PARTY_{SOC}$  par rapport à POM/MAOM : fractionné par MRT
  - La taille des compartiments est différente
  - Les déterminants sont similaires entre  $C_s$  et MAOC, et entre  $C_a$  et POC
  - Les compartiments stables sont plutôt déterminés par les caractéristiques du sol tandis que les compartiments actifs sont déterminés par les entrées de C (= production primaire → climat + usage)
- **Possible difficile d'agir sur la fraction stable car elle dépend surtout de paramètres peu contrôlables !**
- **Y a-t-il un fractionnement meilleur que l'autre ? Il faut voir dans le temps lequel nous permet le mieux de prédire (stocks, fonctions du sol, santé). L'arrivée du RMQS2 pourra nous aider.**

# Des fractionnements complémentaires

- Intérêt majeur du fractionnement  $PARTY_{SOC}$  par rapport à POM/MAOM : fractionné par MRT
  - La taille des compartiments est différente
  - Les déterminants sont similaires entre  $C_s$  et MAOC, et entre  $C_a$  et POC
  - Les compartiments stables sont plutôt déterminés par les caractéristiques du sol tandis que les compartiments actifs sont déterminés par les entrées de C (= production primaire → climat + usage)
- **Possible difficile d'agir sur la fraction stable car elle dépend surtout de paramètres peu contrôlables !**
- **Y a-t-il un fractionnement meilleur que l'autre ? Il faut voir dans le temps lequel nous permet le mieux de prédire (stocks, fonctions du sol, santé). L'arrivée du RMQS2 pourra nous aider.**

Compréhension plus fine du compartiment stable : étude du carbone pyrogénique et de la minéralogie des argiles

→ Temps trop limité pour pouvoir conclure, mais les corrélations aux argiles et aux oxyhydroxydes de fer laissent penser que ça va avoir un impact important !

# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

# Conclusions

**Les méthodes thermiques sont fiables pour compléter/se substituer aux techniques usuelles d'estimation de la stabilité biogéochimique**

# Conclusions

**Les méthodes thermiques sont fiables pour compléter/se substituer aux techniques usuelles d'estimation de la stabilité biogéochimique**

**L'analyse thermique Rock-Eval® est en capacité d'analyser de très grands jeux d'échantillons de manière rapide et reproductible**

# Conclusions

**Les méthodes thermiques sont fiables pour compléter/se substituer aux techniques usuelles d'estimation de la stabilité biogéochimique**

**L'analyse thermique Rock-Eval® est en capacité d'analyser de très grands jeux d'échantillons de manière rapide et reproductible**

**Les grandes cultures et les vignes présentent une stabilité thermique plus importante que les forêts et les prairies**

# Conclusions

Les méthodes thermiques sont fiables pour compléter/se substituer aux techniques usuelles d'estimation de la stabilité biogéochimique

L'analyse thermique Rock-Eval® est en capacité d'analyser de très grands jeux d'échantillons de manière rapide et reproductible

Les grandes cultures et les vignes présentent une stabilité thermique plus importante que les forêts et les prairies

Le fractionnement physique POM/MAOM et le fractionnement thermique avec PARTY<sub>SOC</sub> sont complémentaires

# Conclusions

Les méthodes thermiques sont fiables pour compléter/se substituer aux techniques usuelles d'estimation de la stabilité biogéochimique

L'analyse thermique Rock-Eval<sup>®</sup> est en capacité d'analyser de très grands jeux d'échantillons de manière rapide et reproductible

Les grandes cultures et les vignes présentent une stabilité thermique plus importante que les forêts et les prairies

Le fractionnement physique POM/MAOM et le fractionnement thermique avec PARTY<sub>SOC</sub> sont complémentaires

Les déterminants sont similaires pour les deux compartiments stables (pédologie) et actifs (climat + couvert végétal)



