

➤ Évolution des stocks de carbone organique du sol dans le réseau français de mesures de la qualité des sols

Jose Luis Munera-Echeverri, Line Boulonne, Nicolas Saby, Dominique Arrouays, Claudy Jolivet, Catherine Pasquier, Jean-Philippe Chenu, Benoît Toutain, Manuel Martin

➤ Introduction

- Suivre l'évolution des stocks de COS grâce aux réseaux de surveillance des sols reste un défi.
- Plusieurs accords internationaux obligent les pays à établir et maintenir des inventaires de gaz à effet de serre (GES), incluant les émissions et les puits de carbone comme les sols.
- Peut-on faire une évaluation à grande échelle : régionale, nationale ?

étude	Lieu
De Rosa et al., 2024	Europe
Grüneberg et al., 2014	Allemagne
Knotters et al., 2022	Pays Bas
Taghizadeh-Toosi et al., 2014	Danemark
Moll-Mielewczik et al., 2023	Suisse
Bellamy et al., 2005	Angleterre
L. Bentley et al. 2025	Angleterre

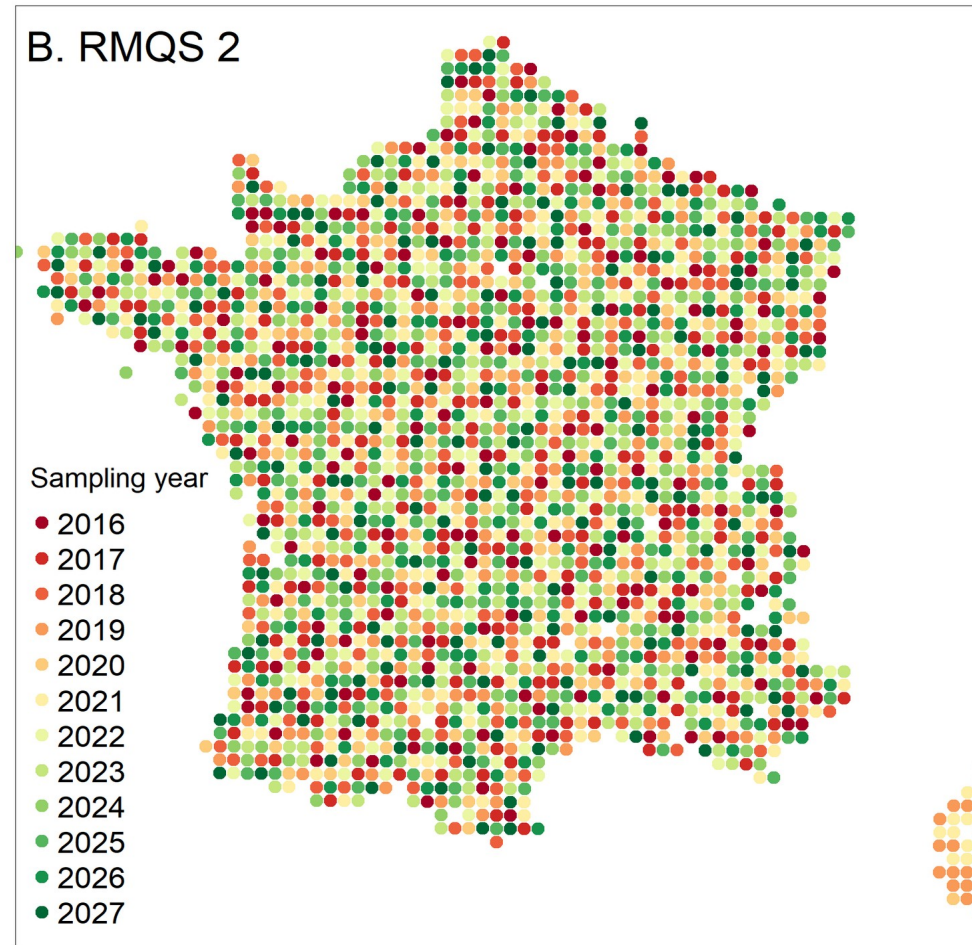
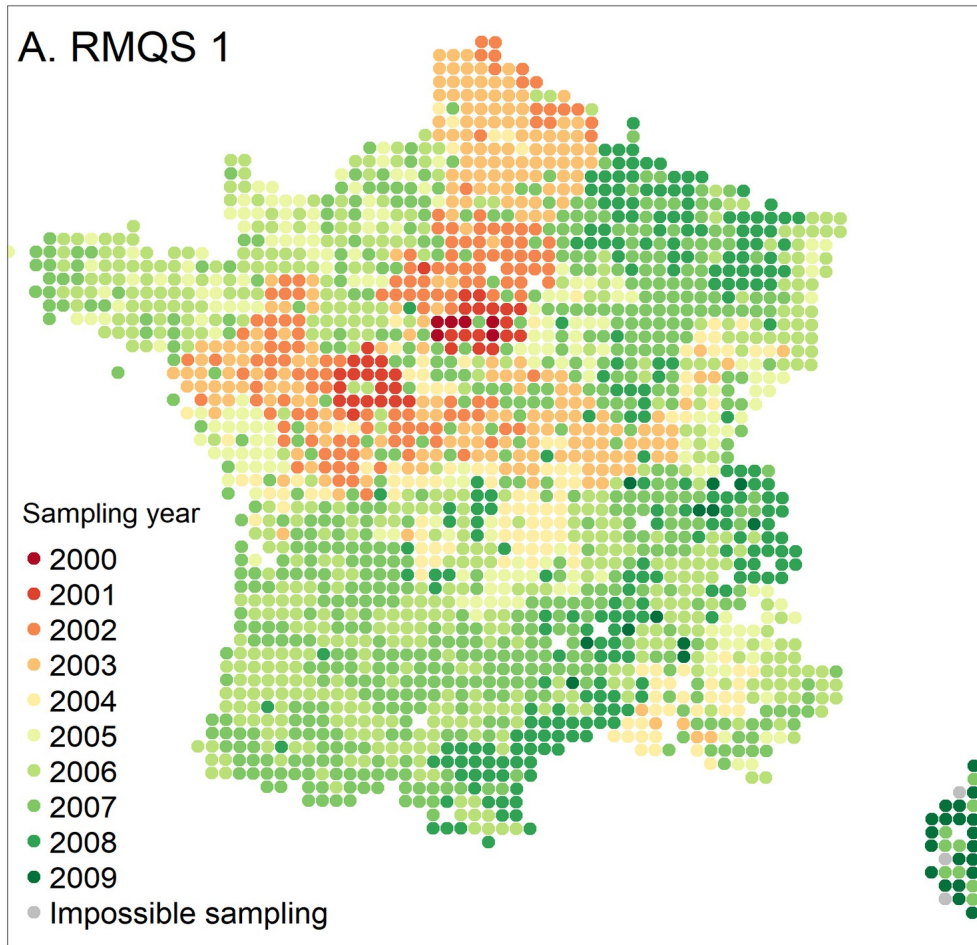


Plan de la présentation

- 1) Méthode
- 2) Résultats 2016-2018
- 3) Premiers résultats incluant 2019 et puissance du réseau
- 4) Le cas des forêts : limites et incertitudes à lever
- 5) Perspectives et conclusions



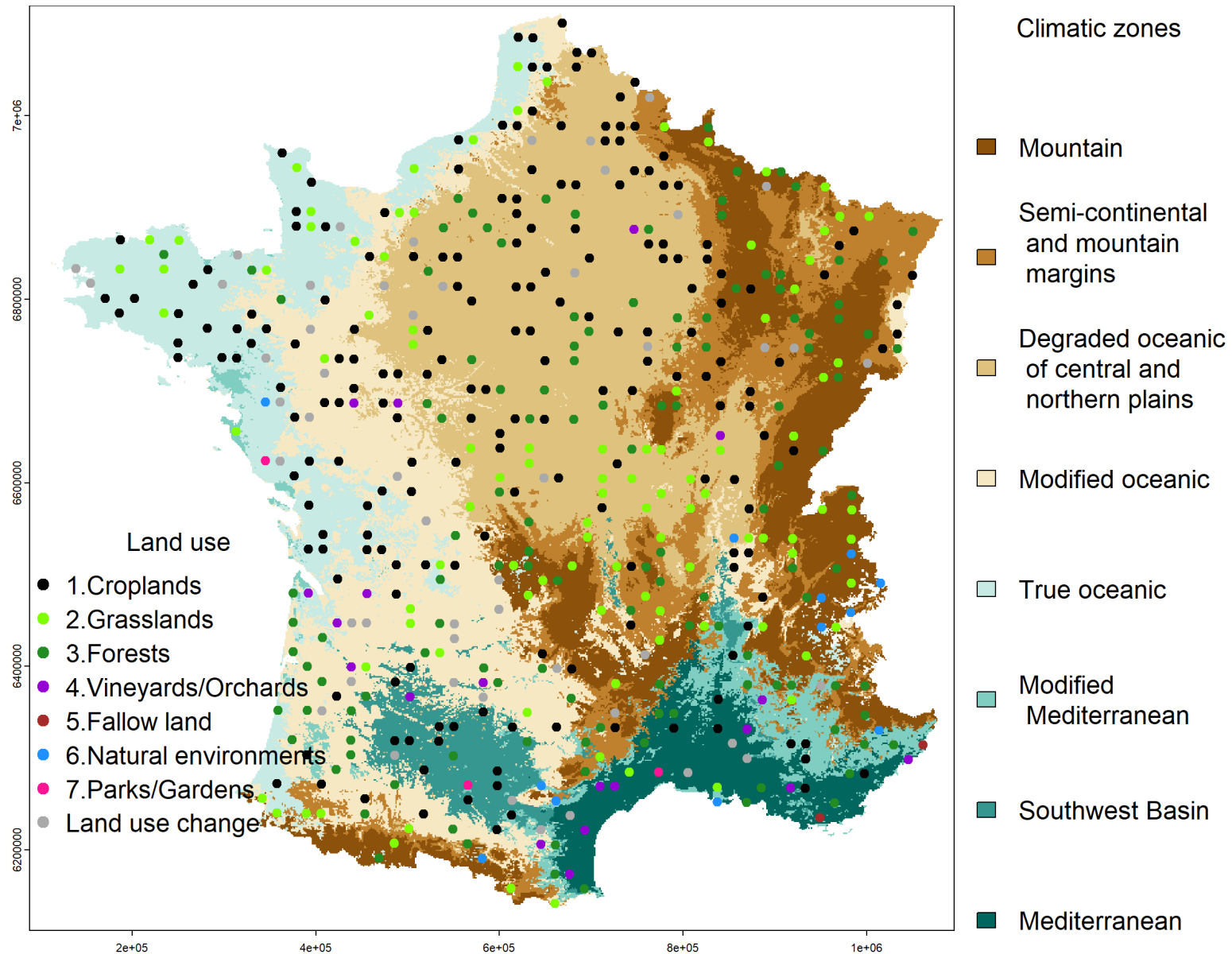
➤ Stratégie d'échantillonnage



Années RMQS 2 disponibles:

- 2016 (N=169)
- 2017 (N=166)
- 2018 (N=162)

➤ Sites disponibles



> Calcul de la variation des stocks

Stocks de COS pour une couche composite dans chaque campagne.

$$\text{Stock COS (Mg COS ha}^{-1}\text{)} = DA * (1 - EG/100) * COS$$

Changement des stocks de COS pour une couche :

$$\text{Taux de changement du COS (Mg COS ha}^{-1}\text{an}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Stock RMQS 2} - \text{Stock RMQS 1}}{\text{Temps entre les prélèvements}}$$

- Dispositif non adapté pour intégrer d'éventuelles variations de densité apparente
- De subtiles évolutions des protocoles de prélèvement qui compliquent le calcul des variations
- Mise en place d'une méthode de calcul standard sur l'ensemble des sites sur les couches 0-30 et 30-50cm (Munera-Echeverri et al., 2025, Catena)



CATENA
Volume 248, January 2025, 108609

Bulk density and coarse fragment content of the French soil monitoring network for better assessment of changes of soil organic carbon stocks

José-Luis Munera-Echeverri, Line Boulonne, Dominique Arrouays, Nicolas Saby, Nicolas Soler-Dominguez, Céline Ratié, Claudy Jolivet, Manuel P. Martin



Data in Brief
Volume 56, October 2024, 110767

Data Article

Datasets on bulk density and coarse fragment content from the French soil quality monitoring network

Jose-Luis Munera-Echeverri, Line Boulonne, Nicolas P.A. Saby, Dominique Arrouays, Benoît Bertouy, Eva Lacarce, Floriane Serré, Benoît Toutain, Florent Millet, Thomas Loiseau, Manuel Martin



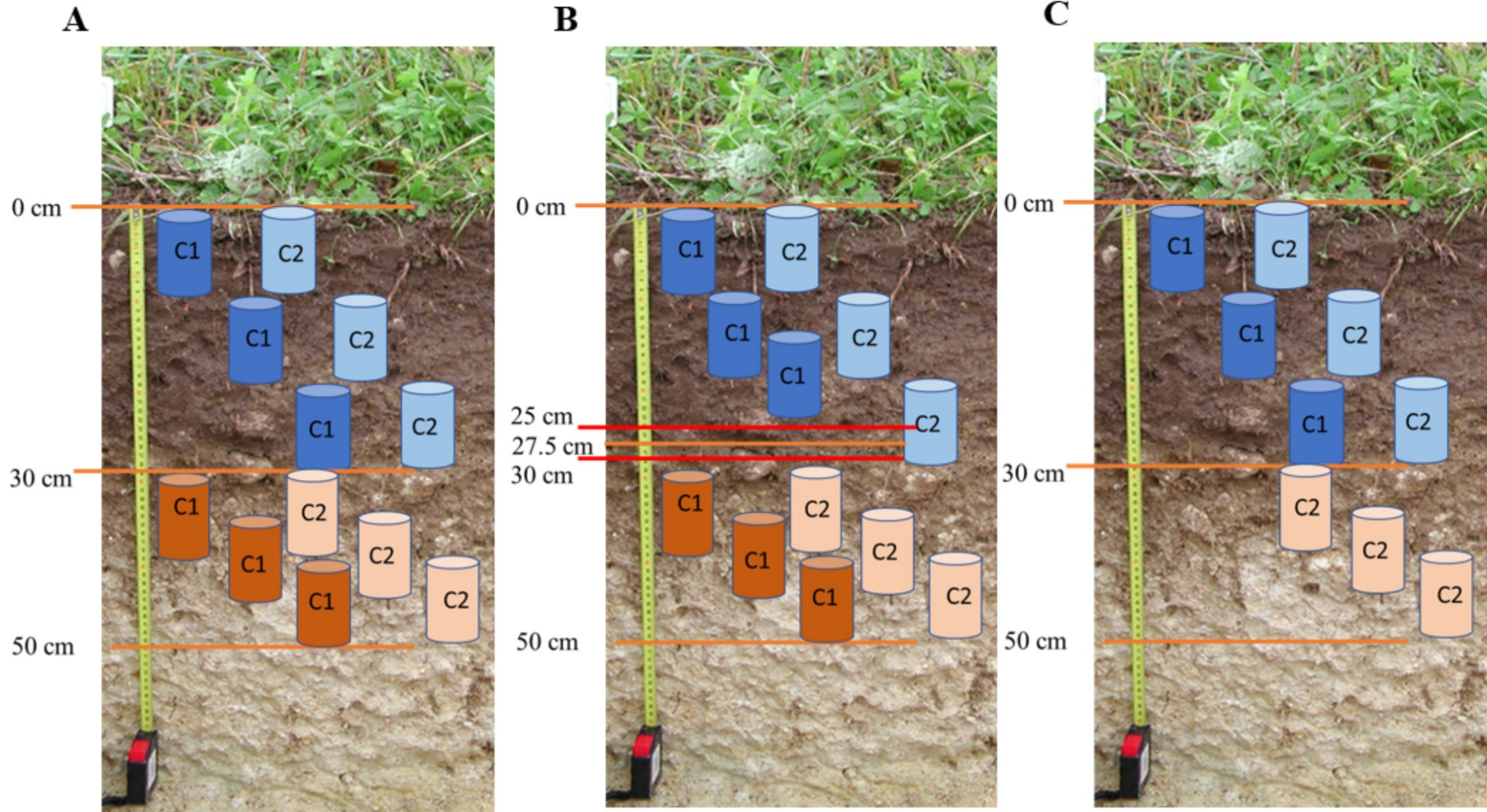
INRAE

Evolution du carbone organique des sols
10 Février 2026 / Journées RMQS

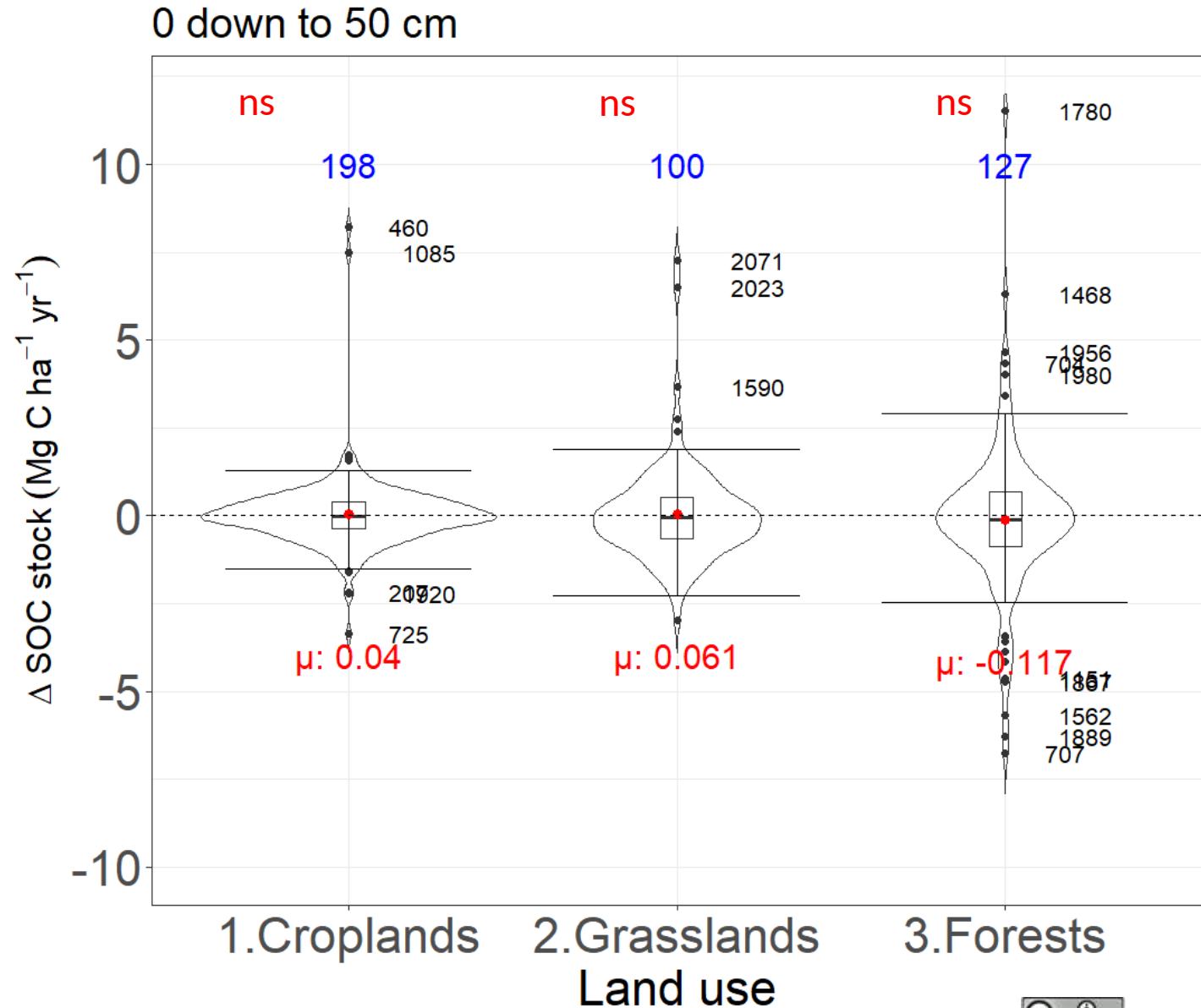
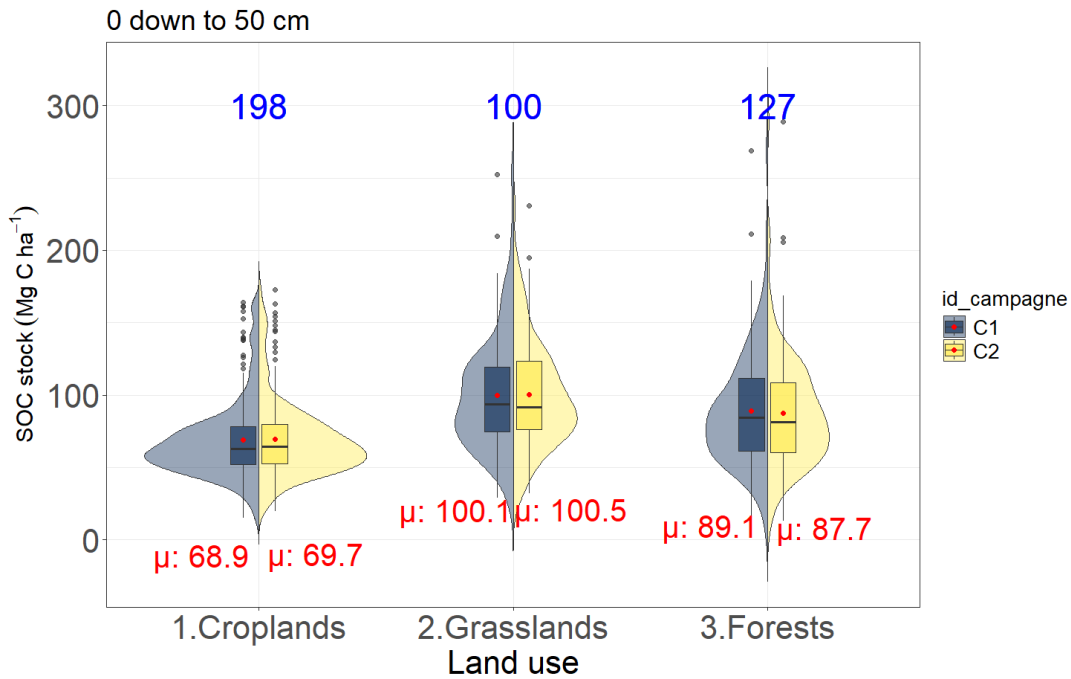


p. 6

➤ Combinaison des mesures de densité apparente



➤ Variations sur 0-50cm (hors horizons organiques)

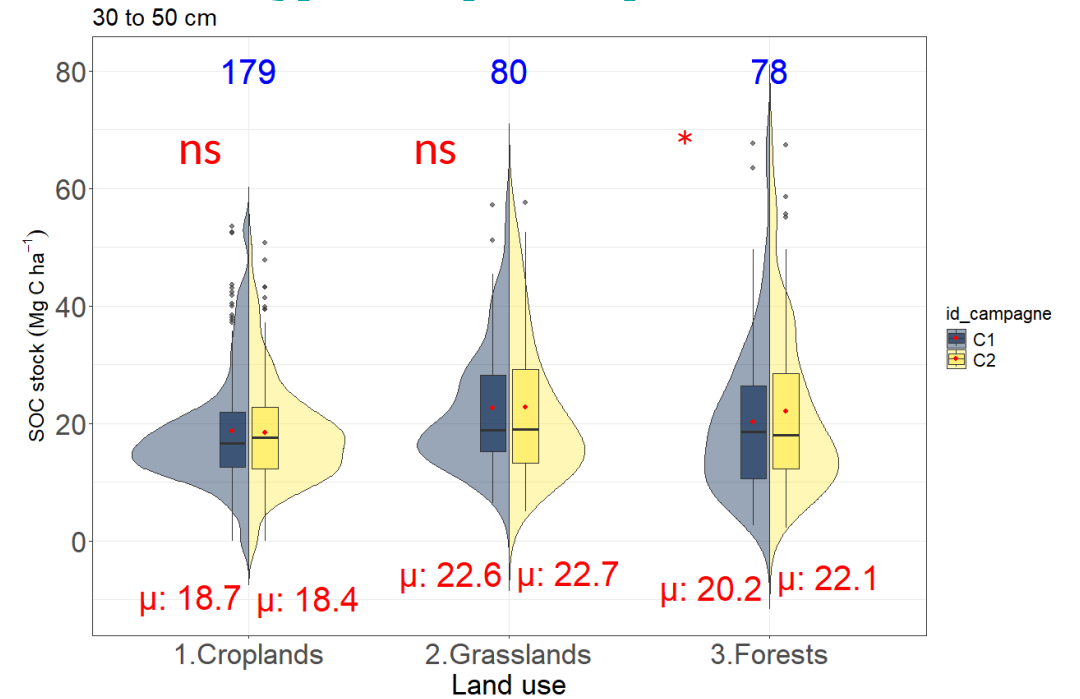
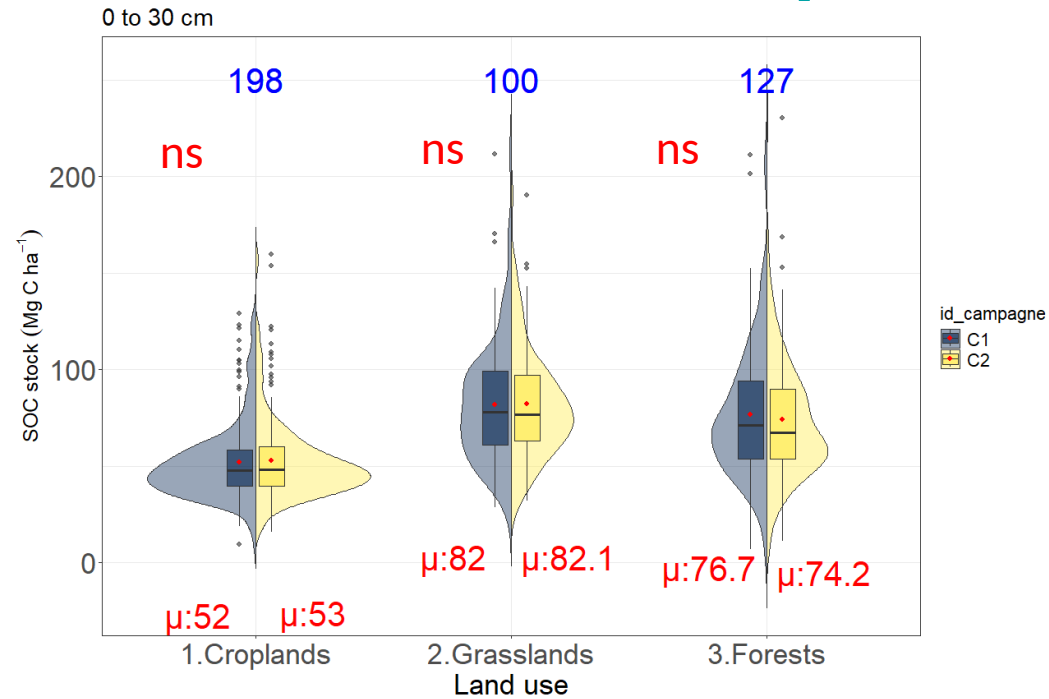


INRAE

Evolution du carbone organique des sols
10 Février 2026 / Journées RMQS



> Sur 0-30 et 30-50cm (hors horizons organiques)



Land use	Layer	Mean		Median		Sampling variance	p value	
		Mg SOC ha ⁻¹ yr ⁻¹	95% CI	Mg SOC ha ⁻¹ yr ⁻¹	n		Shapiro	Wilcoxon
1. Croplands	0-30 cm	0.0717	(-0.0575,0.2009)	0.0253	198	0.004	3.8E-24	0.58
1. Croplands	30-50 cm	-0.0372	(-0.0988,0.0244)	-0.0133	179	0.001	2.4E-06	0.44
1. Croplands	0 down to 50cm	0.0405	(-0.1059,0.1868)	-0.0201	198	0.006	2.6E-19	0.97
2. Grasslands	0-30 cm	0.0224	(-0.2119,0.2568)	-0.18	100	0.014	2.2E-08	0.35
2. Grasslands	30-50 cm	0.0261	(-0.0881,0.1402)	-0.0369	80	0.003	1.8E-05	0.93
2. Grasslands	0 down to 50cm	0.0607	(-0.2027,0.3241)	-0.0517	100	0.018	2.3E-09	0.54
3. Forests	0-30 cm	-0.2345	(-0.5909,0.1219)	-0.1061	127	0.032	2.8E-08	0.11
3. Forests	30-50 cm	0.1917	(0.0239,0.3594)	0.1305	78	0.007	1.0E-03	0.01
3. Forests	0 down to 50cm	-0.1168	(-0.5334,0.2999)	-0.1118	127	0.044	2.7E-08	0.41

➤ Stratification environnementale

4. Emerging trends by climatic zone *

Croplands

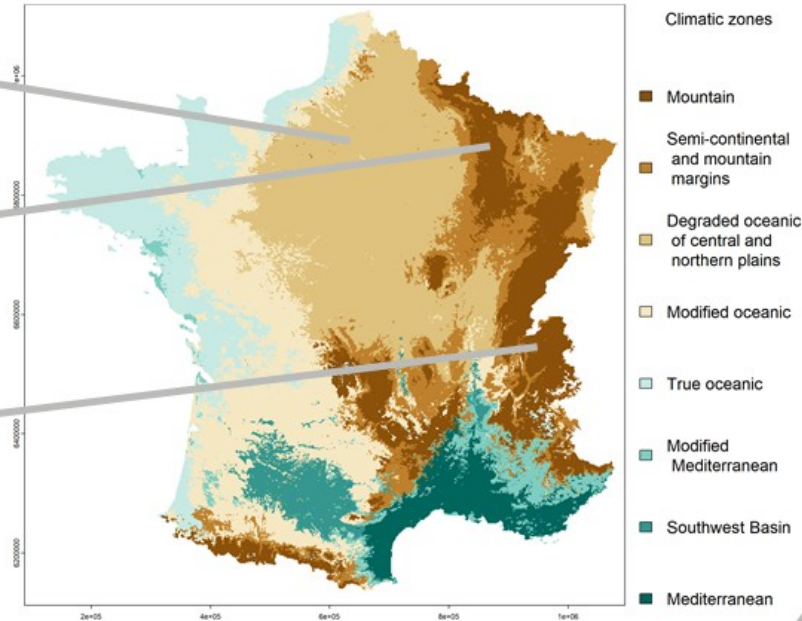
↑ 0-30cm Degraded
oceanic

Grasslands

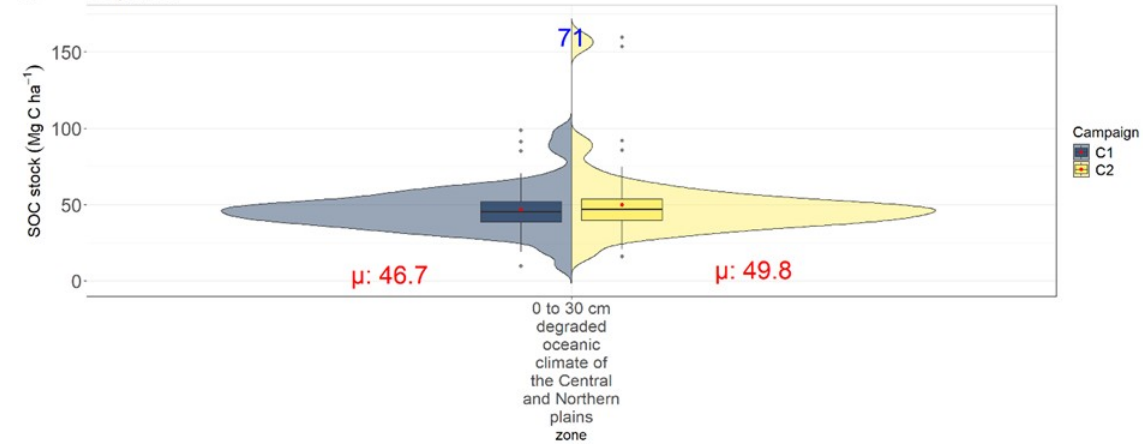
↓ 0-30cm
mountain

Forests

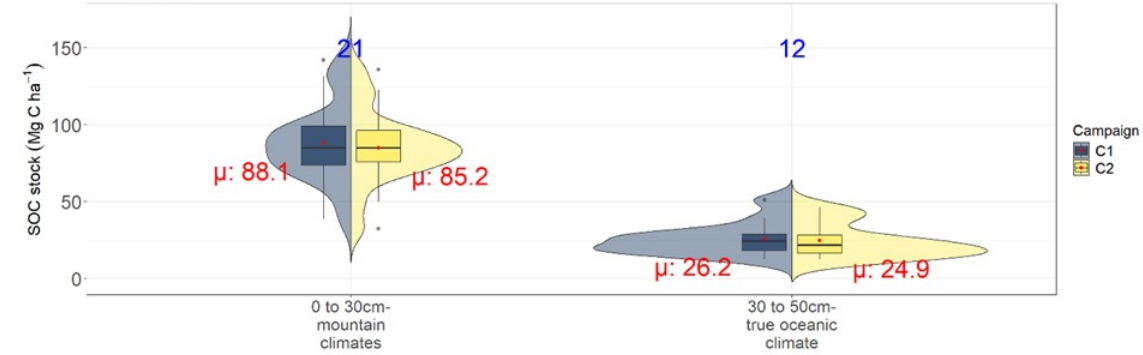
↑ 30-50 cm
Mountain &
modified oceanic



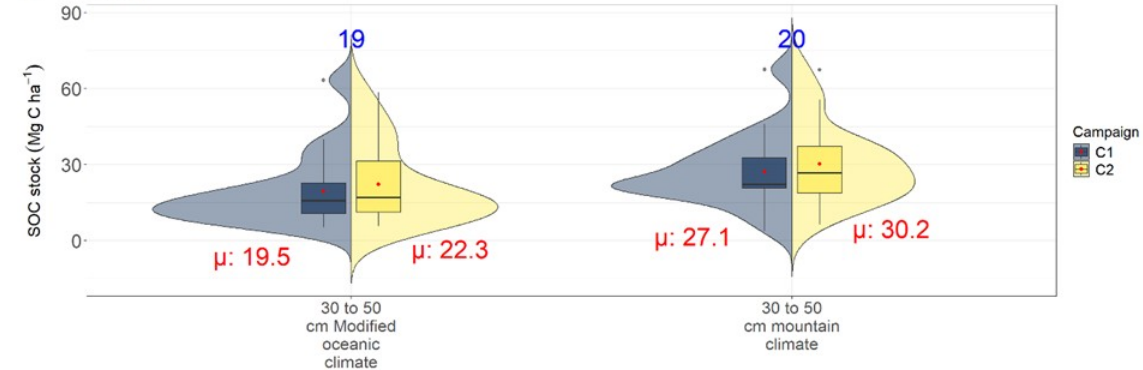
A Croplands



B Grasslands

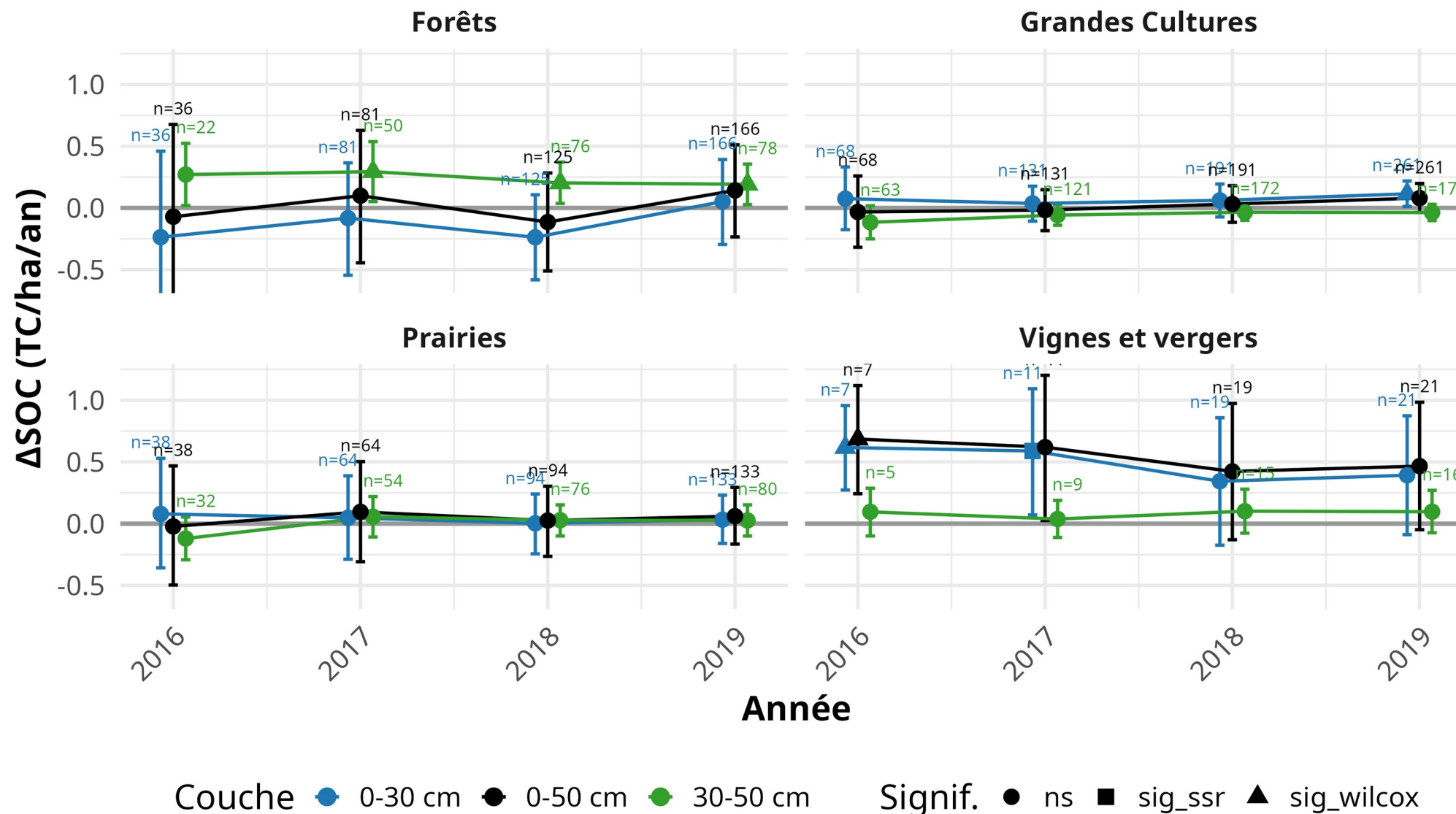


C Forests

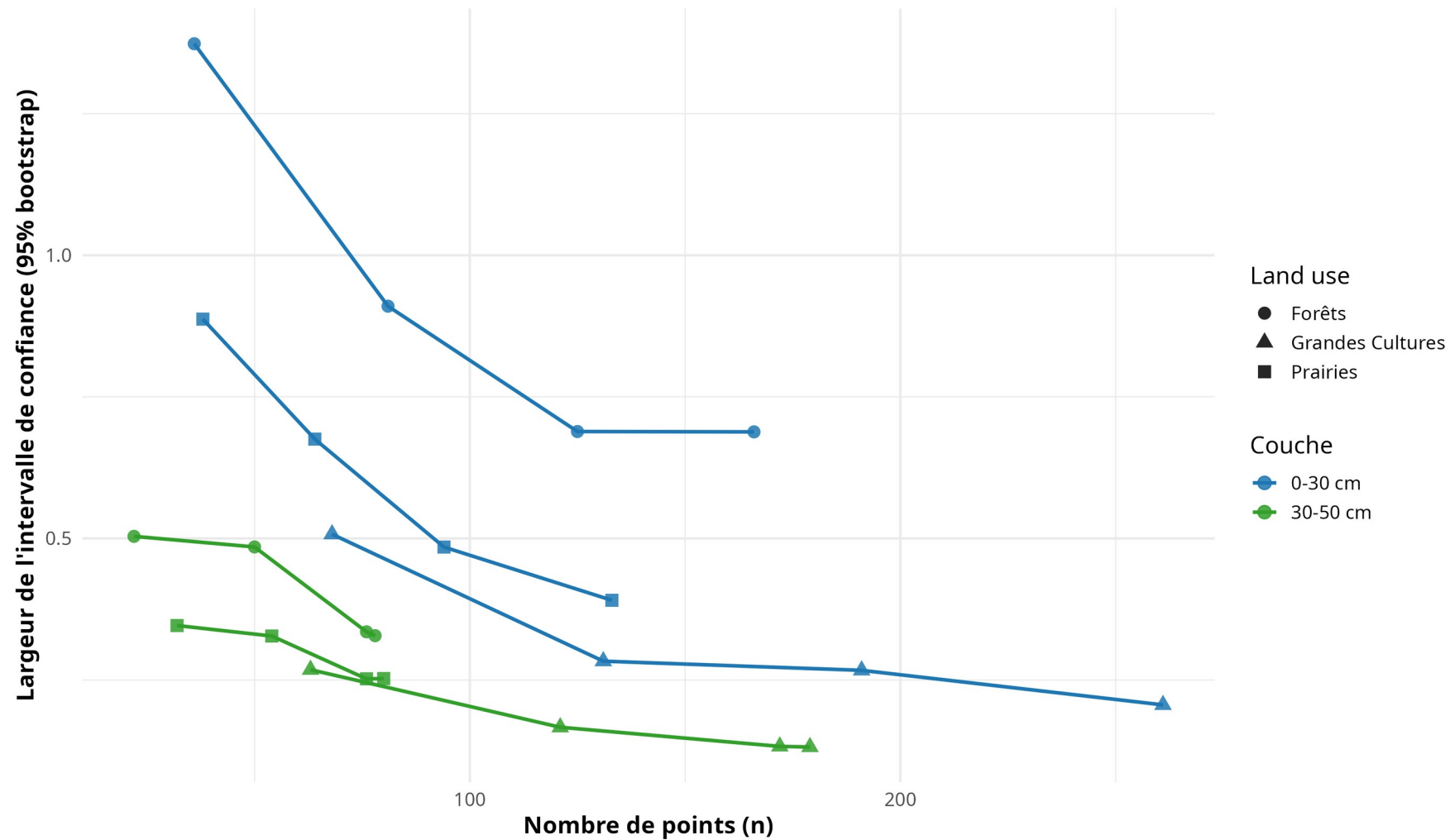


> Evolution du signal et puissance du réseau

+ 2019 ! (N=165)



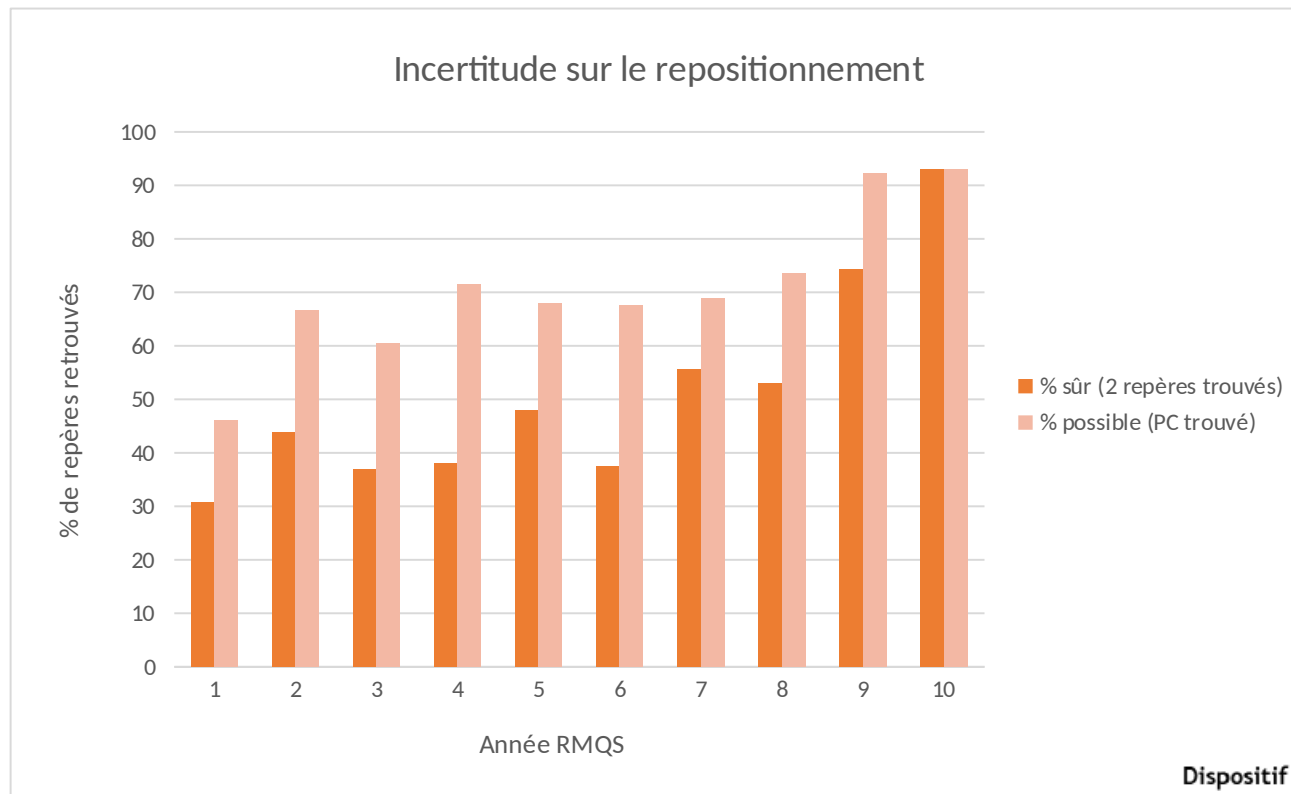
➤ Evolution du signal et puissance du réseau



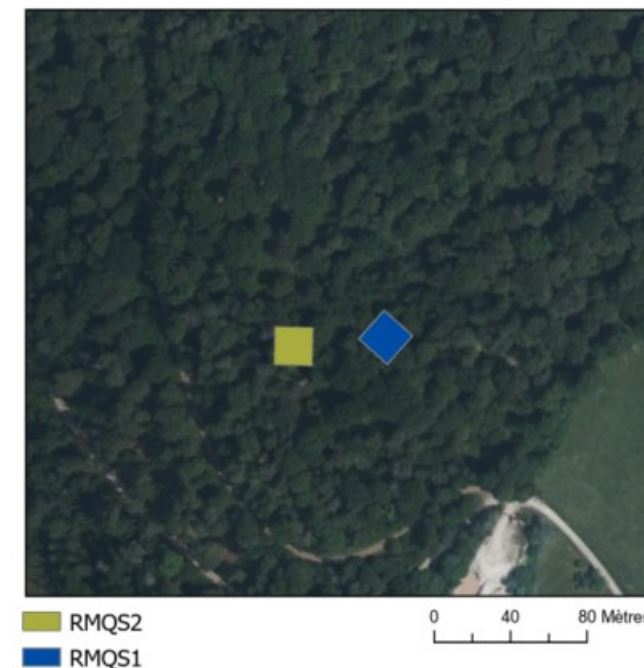
Pour les forêts : limites et incertitudes à lever



➤ La question du positionnement en deuxième campagne

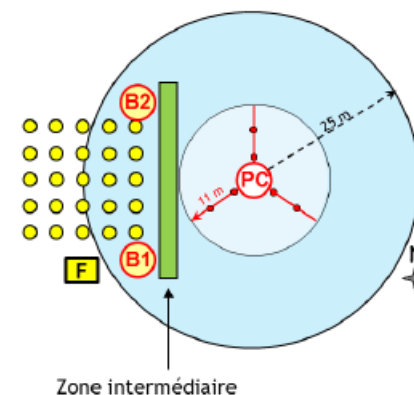


Informations supplémentaires depuis les passages
seconde campagne : => Il faut retourner sur les sites qui
n'ont pas été retrouvés



Dispositif RMQS-BioSoil :

- Surface d'échantillonnage
- (B1) (B2) Bornes repères
- (F) Fosse pédologique

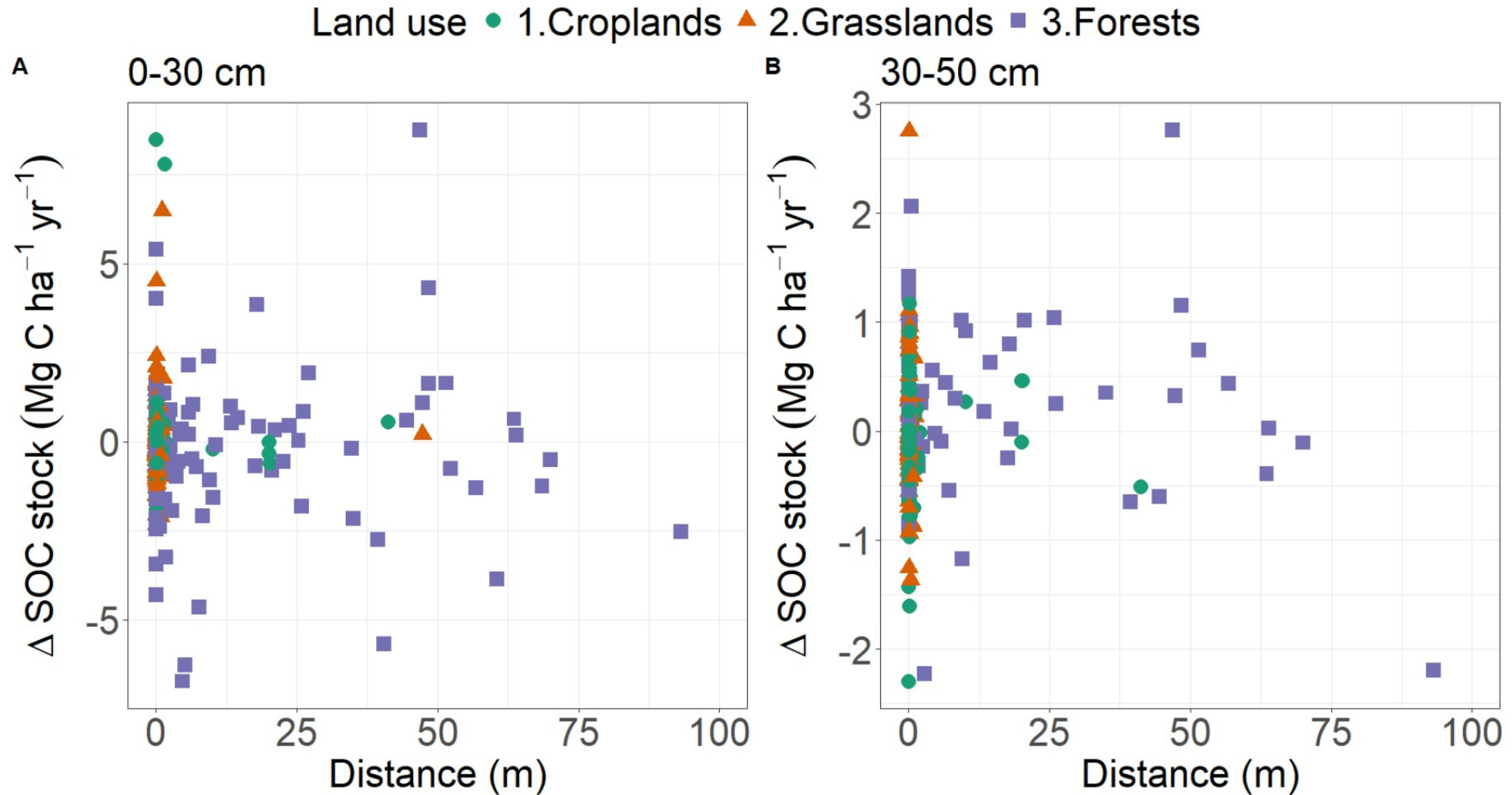


Dispositif BioSoil :

- (PC) Piquet central
- Point de prélèvement sol
- Zone centrale d'échantillonnage de sol et de relevés écologiques et floristiques (400 m²)
- Zone étendue d'observation des espèces arborées forestières recensables (2000 m²)

Figure 4 – Dispositifs BioSoil et RMQS-BioSoil

➤ La question du positionnement en deuxième campagne



⇒ Pas d'influence systématique sur le signe de la variation,
mais impact probable sur la précision du réseau

➤ Prise en compte des horizons holorganiques

- Variations (+) observées dans les horizons organo-minéraux
- Pertinence d'un reporting sans les humus (cf. Jonard et al., variations significatives et importantes dans ces horizons)?
- Analyse des variations de stock dans ces horizons inter-campagne :
 - ¹ Présence/absence d'une campagne sur l'autre
 - ² Variation des volumes et masses
 - ³ Comparaison des stocks de carbone

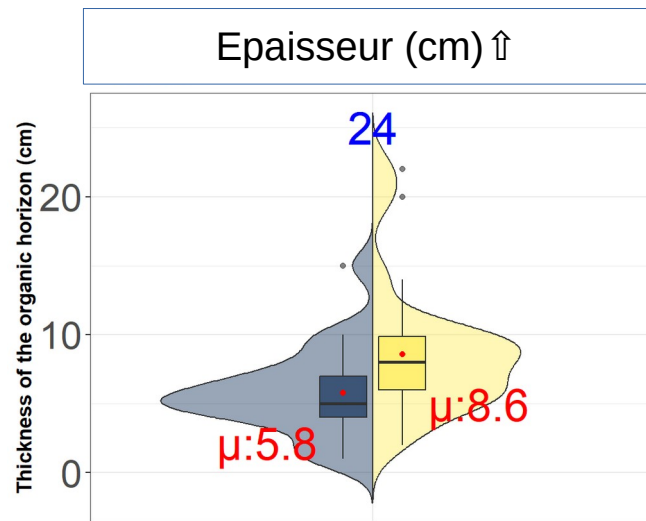


Tiré du manuel RMQS

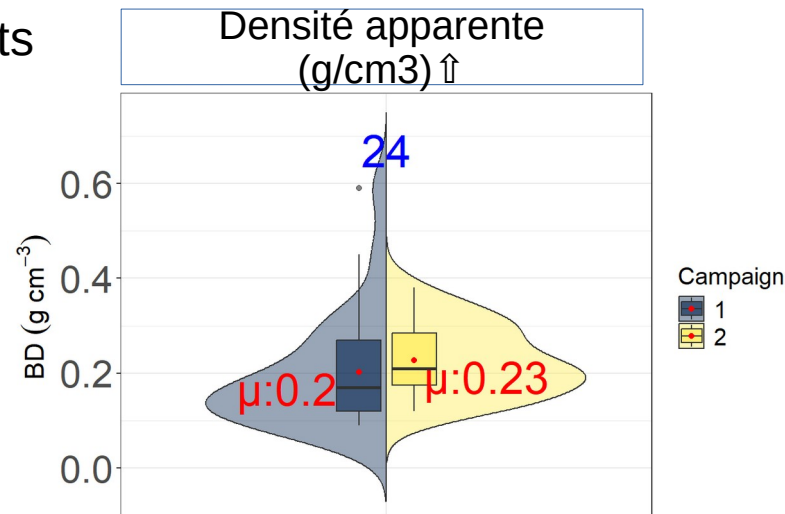
➤ Prise en compte des horizons holorganiques

Prélèvements en Campagne 1 vs. Campagne 2 (2016, 2017, 2018), forêts et prairies

		C1	
		Oui	Non
C2	Oui	30	24
	Non	7	95



Forêts



C1 vs. C2



Tiré du manuel RMQS

⇒ Nécessité de disposer des analyses de C et de perte au feu
(biais de prélèvement des H organo-minéraux)

➤ En enfin : la profondeur des prélèvements

- la question des profondeurs de prélèvements : prélèvements systématiquement plus profonds en C1 vs. C2
- +3.58 cm, statistiquement significatif (N=78, pour les sites avec composite 2) !
- Toutefois plus à même de rendre notre estimation d'augmentation des stocks conservatrice...

➤ Discussion

- Nos résultats ne montrent pas nécessairement ce qui est généralement attendu en termes de stockage du carbone organique du sol, par ex :
 - Forêts: (**+0.35** Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ sur 0 à 40 cm + litière entre 1993-2012; Jonard et al. 2017;RENECOFOR).
 - Prairies permanentes: augmentation (**+0.212** Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ de 0 à 30 cm ; Pellerin et al., 2021).
 - Terres arables: (**-0.17** Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ entre 1990-1999 sur 0-30cm; Ciais et al., 2010;Pellerin et al., 2021).
- Les données disponibles ont limité jusqu'à présent le recours à des stratifications plus complexes et notamment pour distinguer les types de gestion.

> Conclusions

- Au niveau national, aucun changement significatif des stocks en surface (0-30 cm) et en profondeur (30-50 cm) sauf pour les forêts, et les grandes cultures (0-30cm, en incluant 2019, à *confirmer*).
- Stratifier par zones climatiques permet d'identifier des changements significatifs (ex : terres arables 0 à 30 cm + 0.23 Mg COS ha⁻¹ an⁻¹ pour les climats océaniques dégradés des plaines du nord et du centre).
- Incertitude sur la moyenne: intervalles de confiance très dépendants de l'occupation du sol, mais qui pourraient être compatibles avec certains objectifs visés (e.g. 4p1000).
- Résultats provisoires (~ 33% du réseau), en attente de nouvelles analyses, y compris sur les litières, pour confirmer les résultats, et affiner les interprétations.

➤ **Merci pour votre attention.**

➤ Perspectives et possibles points de blocage humains et financiers

- En amont :
 - Analyses des litières
 - Analyses physico-chimiques des prélèvements déjà préparés (seules **3 années / 9** sont disponibles actuellement)
 - CEES : moyens pour la préparation des échantillons déjà prélevés
- Concernant le traitement des données carbone (financements post-2025 non acquis) :
 - Consolidation des résultats sous forêt
 - Automatisation des scripts d'analyse déjà conçus : **rapportage carbone annuel** et à jour des analyses disponibles
 - Spatialisation et *explication* des variations observées => connaissances pour accompagner l'**élaboration de politiques publiques**

> Stratification environnementale

Climate zone	Land use	Layer	Mean	95% CI	Median	n	Sampling variance	p value	p value	p value
			<i>Mg SOC ha⁻¹ yr⁻¹</i>		<i>Mg SOC ha⁻¹ yr⁻¹</i>			Shapiro	Wilcoxon	t test
Mountain climate	Grasslands	0-30 cm	-0.2809	[-0.6287,0.0669]	-0.3105	21	0.028	0.751	0.070	0.108
	Forests	30-50 cm	0.3096	[-0.044,0.6632]	0.3053	20	0.029	0.766	0.027	0.083
Degraded oceanic climate of the Central and Northern plains	Croplands	0-30 cm	0.2323	[-0.1154,0.5801]	0.0433	71	0.030	0.000	0.064	0.187
Modified oceanic climate	Forests	30-50 cm	0.2491	[-0.0753,0.5735]	0.2496	19	0.024	0.023	0.060	0.124
True oceanic climate	Grasslands	30-50 cm	-0.1072	[-0.2071,-0.0072]	-0.1393	12	0.002	0.970	0.266	0.038

➤ Analyses statistiques

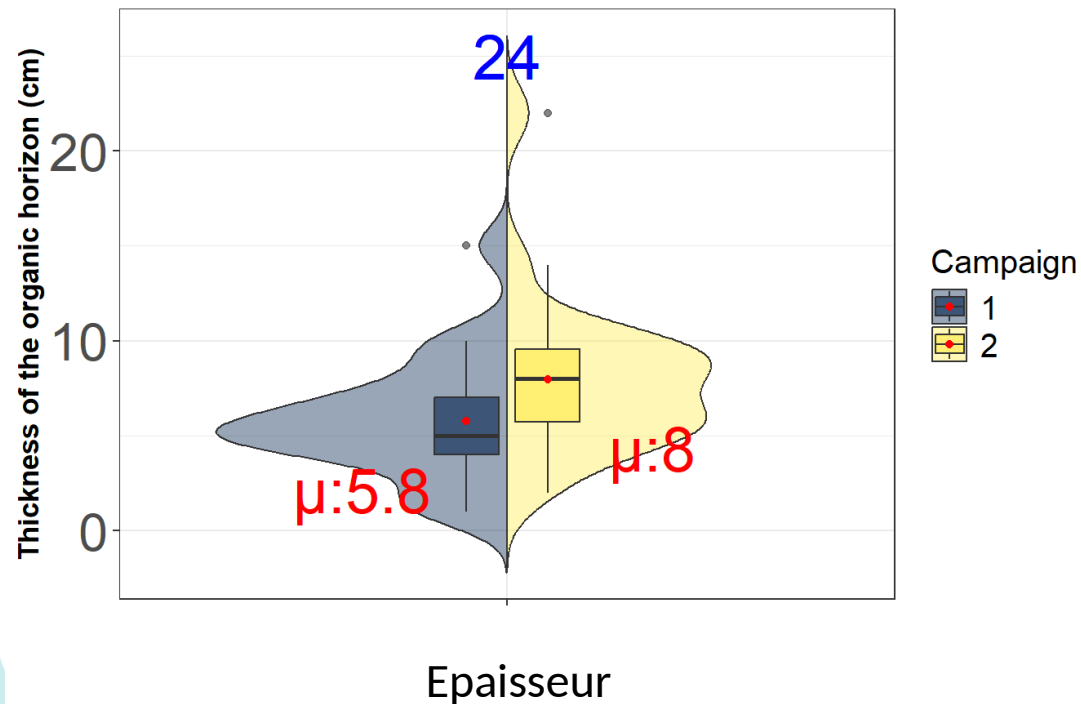
- Échantillons appariés
- L'hypothèse nulle: taux de changement annuel des stocks du COS égal à zéro.
- Vérification de normalité : test Shapiro et QQ plots.
- Non paramétrique : tests de rang signée de Wilcoxon pour échantillons appariés.
- Paramétrique: Test t avec variance approximée par échantillonnage aléatoire simple stratifié (Brus et Saby, 2016).

Variation des profondeurs de blocage

	Stratification	Average change of mean sampling depth (cm)	95% CI	Median change of mean sampling depth (cm)	n	p value Shapiro test	p value Wilcoxon test
All sites	National level	1.63	[1.0674,2.1962]	0	513	8.14x10⁻⁴⁰	1.97 x10⁻¹⁶
	1.Croplands	0.27	[-0.5413,1.0851]	0	198	1.42 x10 ⁻²⁰	8.24 x10 ⁻⁰¹
	2.Grasslands	1.46	[0.3936,2.5324]	0	99	1.75 x10⁻⁰⁹	3.92 x10⁻⁰³
	3.Forests	3.93	[2.6364,5.2242]	2.46	127	8.07 x10⁻⁰⁴	2.42 x10⁻⁰⁷
0 to 30 cm	National level	0.42	[0.1612,0.6865]	0	513	2.04 x10⁻³⁴	8.67 x10⁻⁰⁴
	1.Croplands	0.05	[-0.2123,0.3174]	0	198	1.54 x10 ⁻²⁶	8.87 x10 ⁻⁰¹
	2.Grasslands	0.49	[0.2054,0.7707]	0	99	6.96 x10⁻¹⁸	9.02 x10⁻⁰³
	3.Forests	0.99	[0.1928,1.7806]	0	127	2.13 x10⁻¹¹	1.07 x10⁻⁰²
Sites having data for both topsoil and subsoil composites	National level	0.734	[0.1987,1.2683]	0	408	1.81 x10⁻²⁴	6.98 x10⁻⁰⁴
	1.Croplands	-0.06	[-0.7144,0.5978]	0	179	2.76 x10 ⁻²⁰	8.39 x10 ⁻⁰¹
	2.Grasslands	0.46	[-0.6287,1.5417]	0	80	3.07 x10 ⁻¹⁰	1.51 x10 ⁻⁰¹
	3.Forests	3.58	[2.0294,5.1243]	2	78	2.18 x10⁻⁰³	1.28 x10⁻⁰⁵

➤ La question des litières sous forêt

- Cela a-t-il un sens de communiquer des variations de stocks sans intégrer les litières
- ~ **20%** des sites 124 considérés sous forêt disposent de mesure-remesure des litières (valeurs de C non disponibles)
- Sur ces sites, augmentation de l'**épaisseur** (+27.5%), mais aussi de la **densité apparente** (+19%, NS)
=> augmentation des stocks ou modification du mode de prélèvement?
- Quel impact sur les estimations des horizons organo-minéraux?



Densité apparente

