

Utilisation des isotopes stables pour étudier la matière organique du sol: principes, approches et applications

Werbson Lima Barroso, étudiant au doctorat
Membre du comité de la relève du RQRAD

24 avril 2026

Institut de recherche en agriculture et agroalimentaire (IRAA)
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT)



Plan de présentation

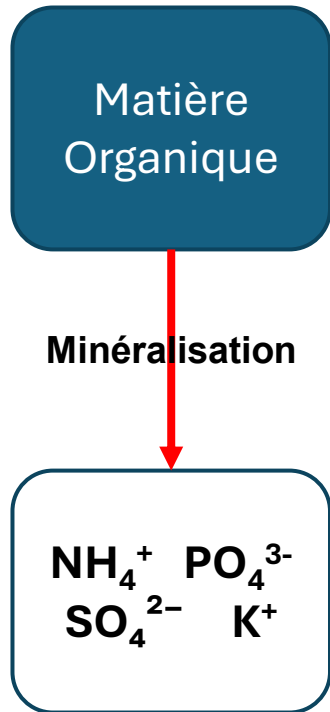
1. Introduction
2. Principes isotopiques
3. Techniques analytiques
4. Approches isotopiques et leurs applications
5. Conclusion

Quelqu'un ici a-t-il déjà travaillé avec des isotopes stables ?

1. Introduction

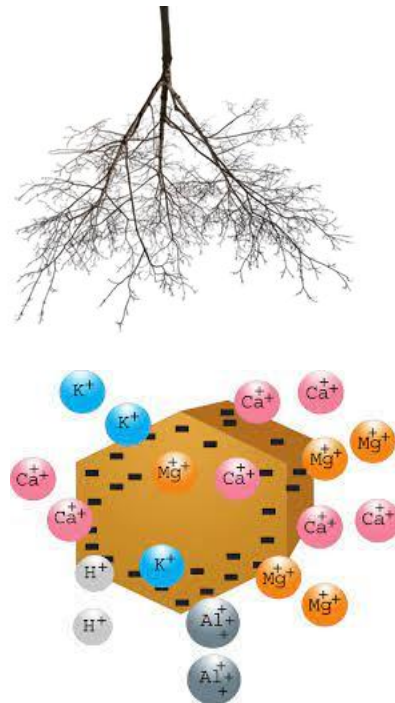
Pourquoi s'intéresser à la matière organique du sol (MOS) ?

❖ Cyclage des nutriments

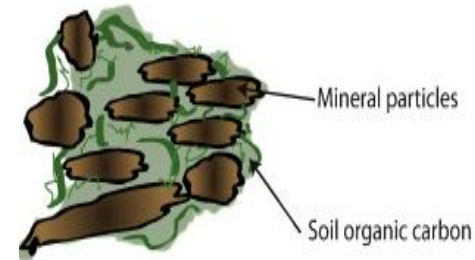


Magdoff et Weil. (2004)

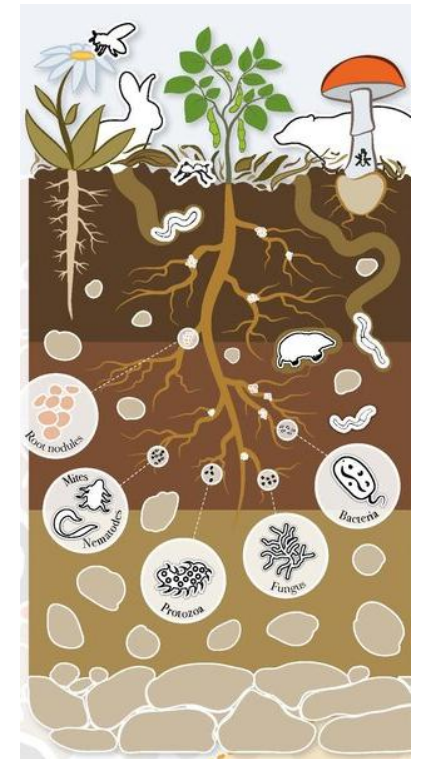
❖ Capacité d'Échange Cationique (CEC)



❖ Physique du sol



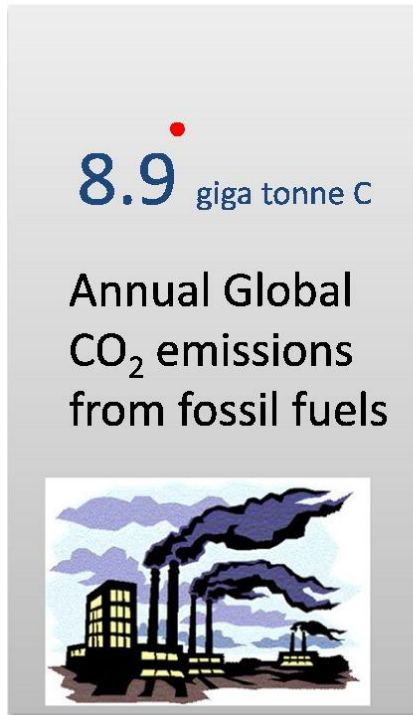
❖ Biodiversité dans le sol



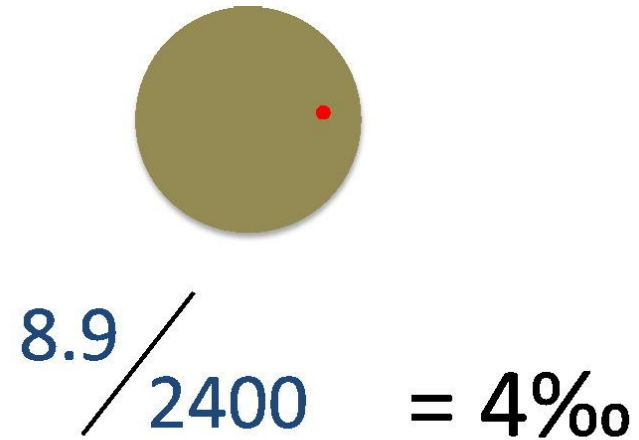
1. Introduction

Pourquoi s'intéresser à la matière organique du sol (MOS) ?

❖ Cycle du carbone



Minasny et al. (2017)



Amount of C stock increase needed to offset CO₂ emission



Pellerin et al. (2020)

1. Introduction

Problématique : MOS = complexité

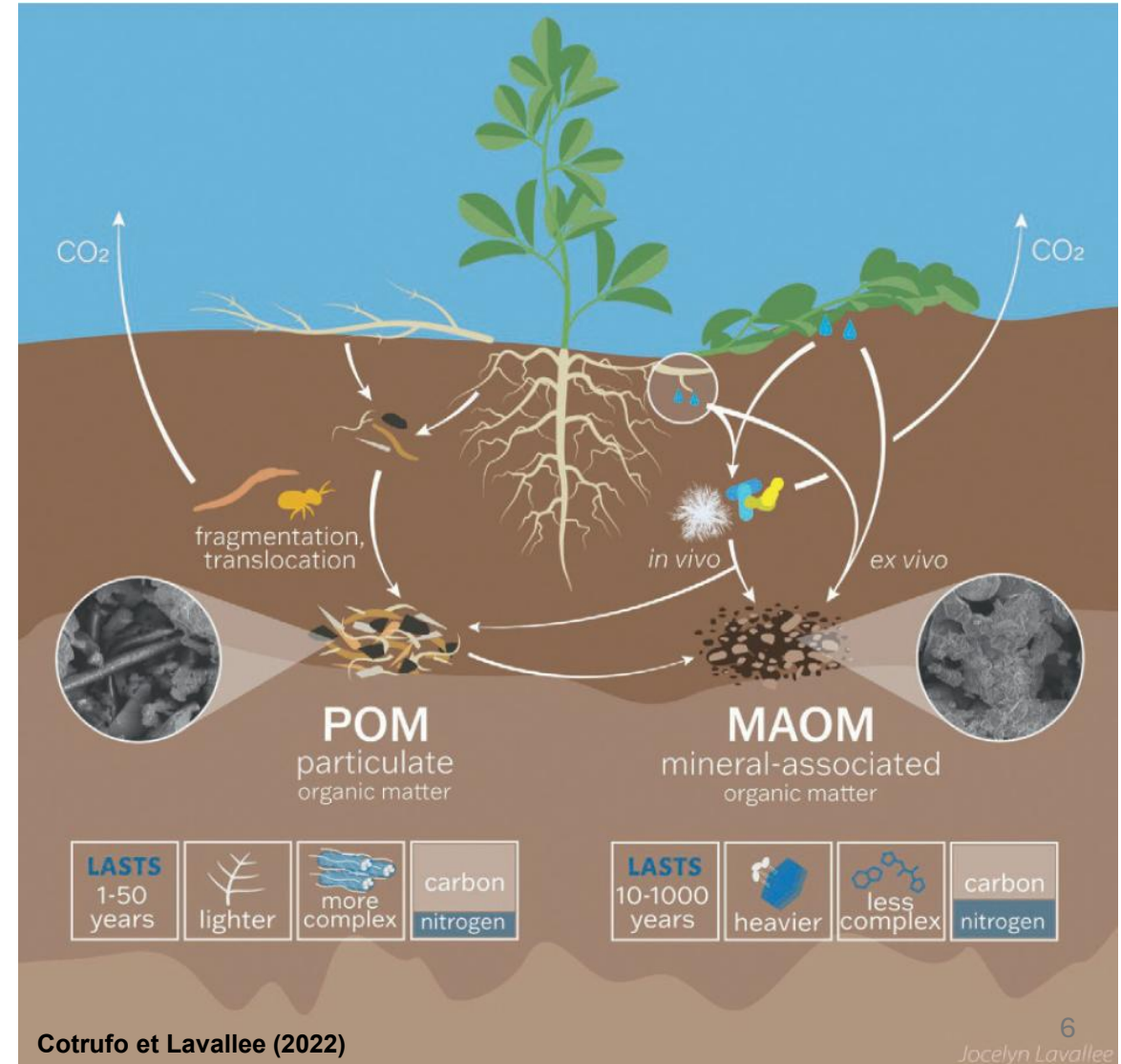
Difficile à suivre :

- (i) Origine
- (ii) Devenir

Des fractions différentes = des fonctions différentes



Quelle quantité de carbone provenant des plantes reste dans le sol, et comment est-elle répartie dans les différentes fractions ?



1. Introduction

Une des solutions : les isotopes stables comme traceurs



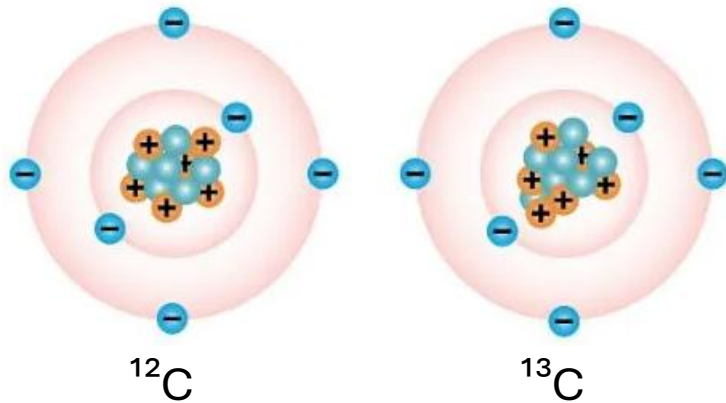
Dans le sol, tout se mélange...
mais les isotopes racontent l'histoire.



2. Principes isotopiques

Même élément ≠ même masse

Isotopes stables du carbone (C)



- 6 électrons
- 6 protons
- 6 neutrons



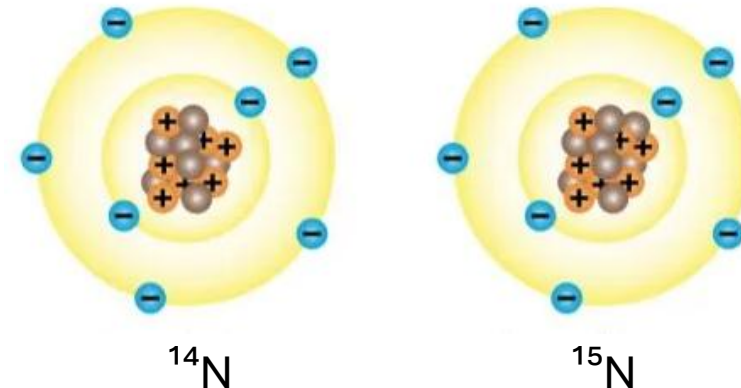
- 98,9 % dans la nature

- 6 électrons
- 6 protons
- 7 neutrons



- 0,9 – 1,1 % dans la nature

Isotopes stables de l'azote (N)



- 7 électrons
- 7 protons
- 7 neutrons



- 99,63 % dans la nature

- 7 électrons
- 7 protons
- 8 neutrons



- 0,37 % dans la nature

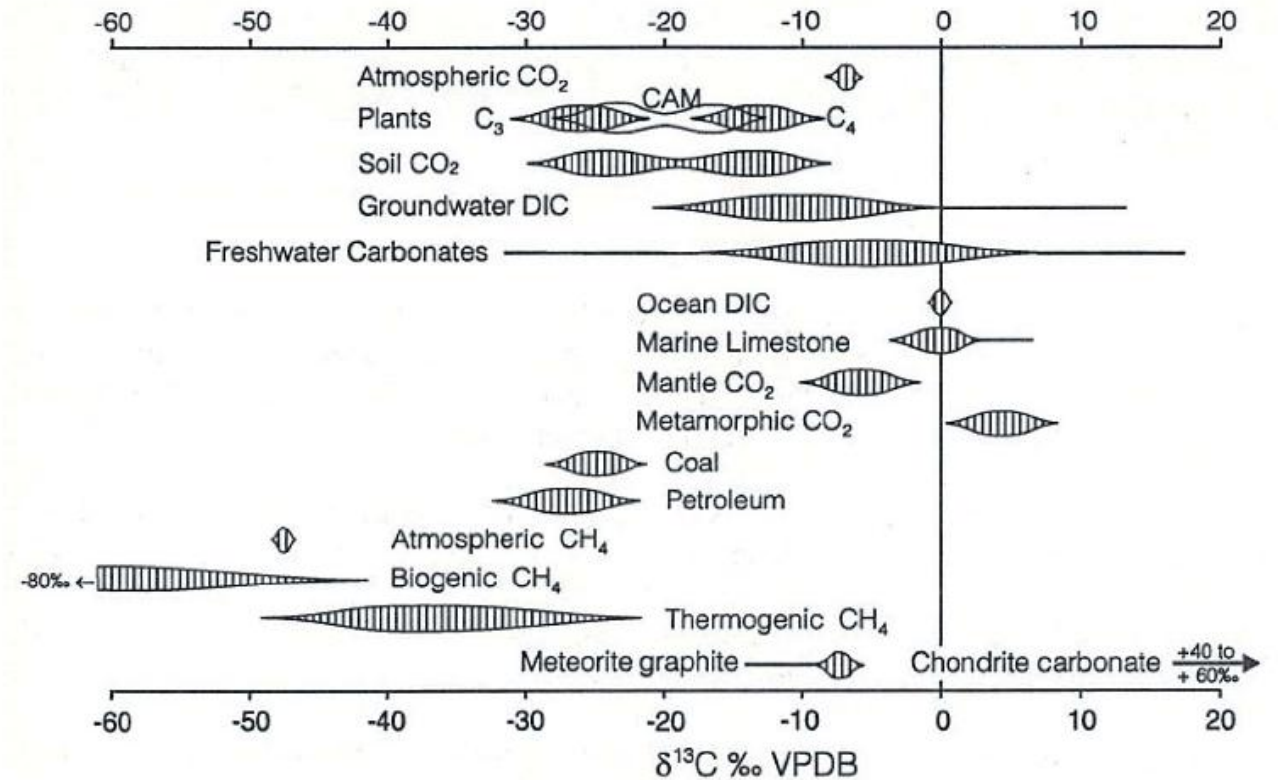
2. Principes isotopiques

$$\delta^{13}\text{C} = 1000 \left[\frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{échantillon}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right]$$

VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite)



File:Fossil-Belemnite-complete.jpg - Wikimedia Commons



Clark et Fritz (1997), cité par González-Ramón (2012)

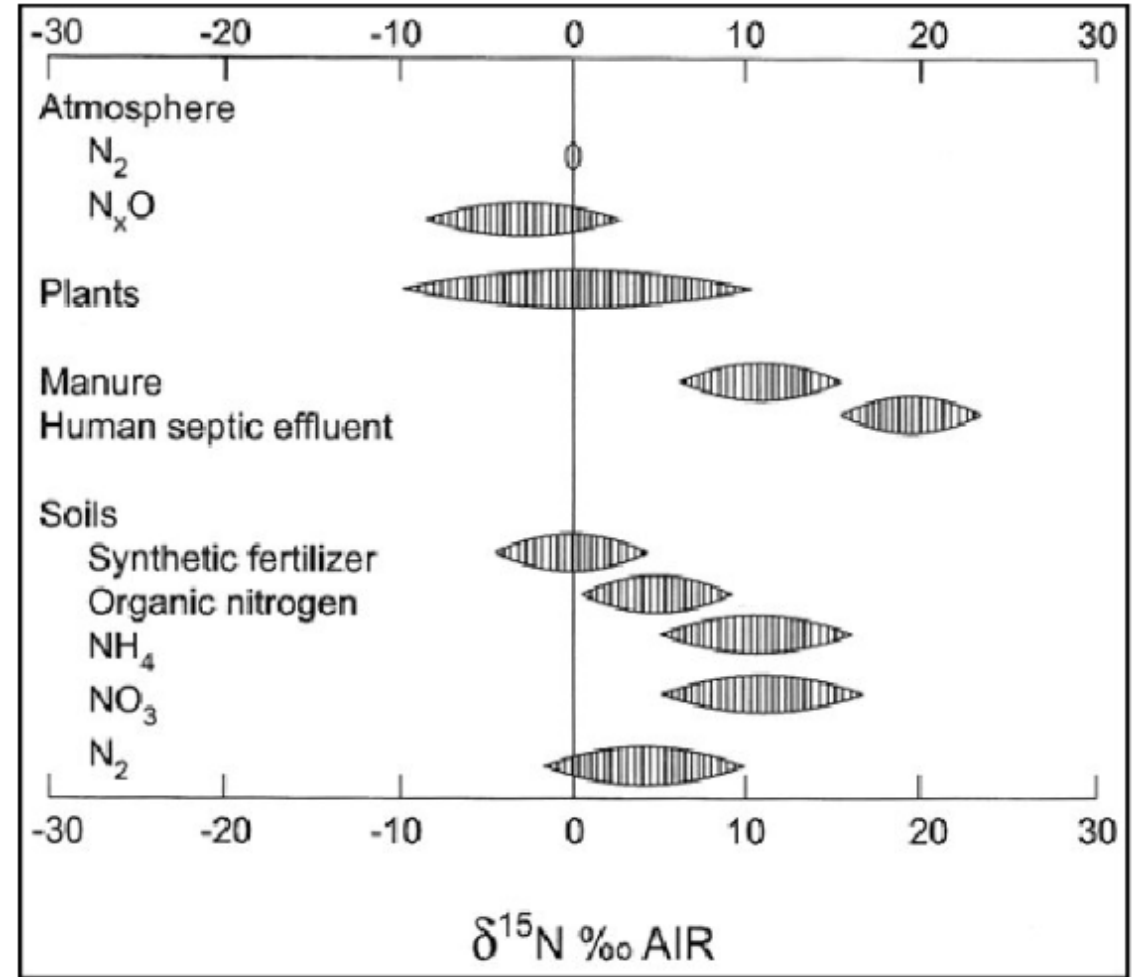
2. Principes isotopiques

$$\delta^{15}\text{N} = 1000 \left[\frac{\left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{sample}}}{\left(\frac{^{15}\text{N}}{^{14}\text{N}} \right)_{\text{standard}}} - 1 \right]$$

L'air



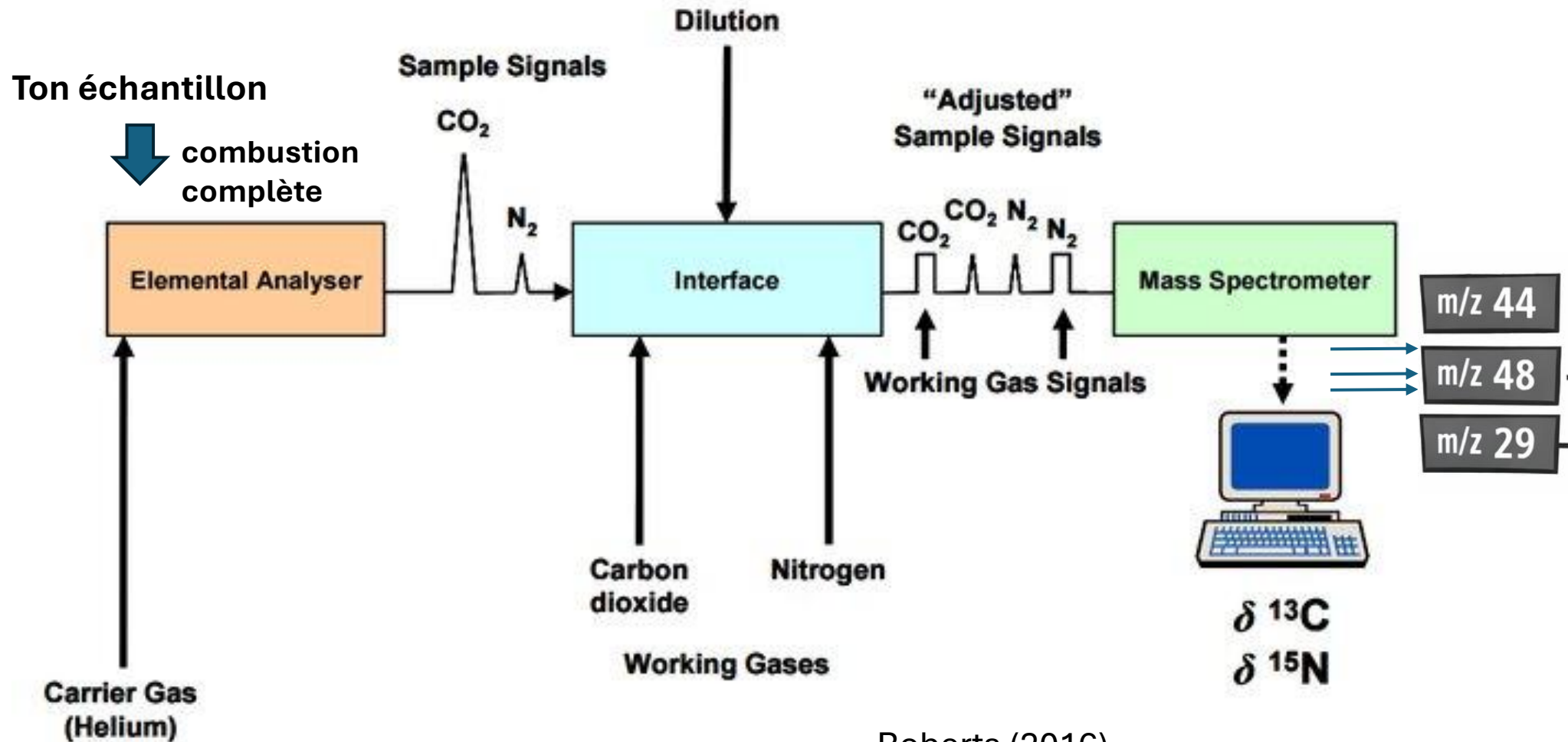
¿Qué es la atmósfera?: Características.
Capas e importancia para la vida



Blumenshine et al. (2007)

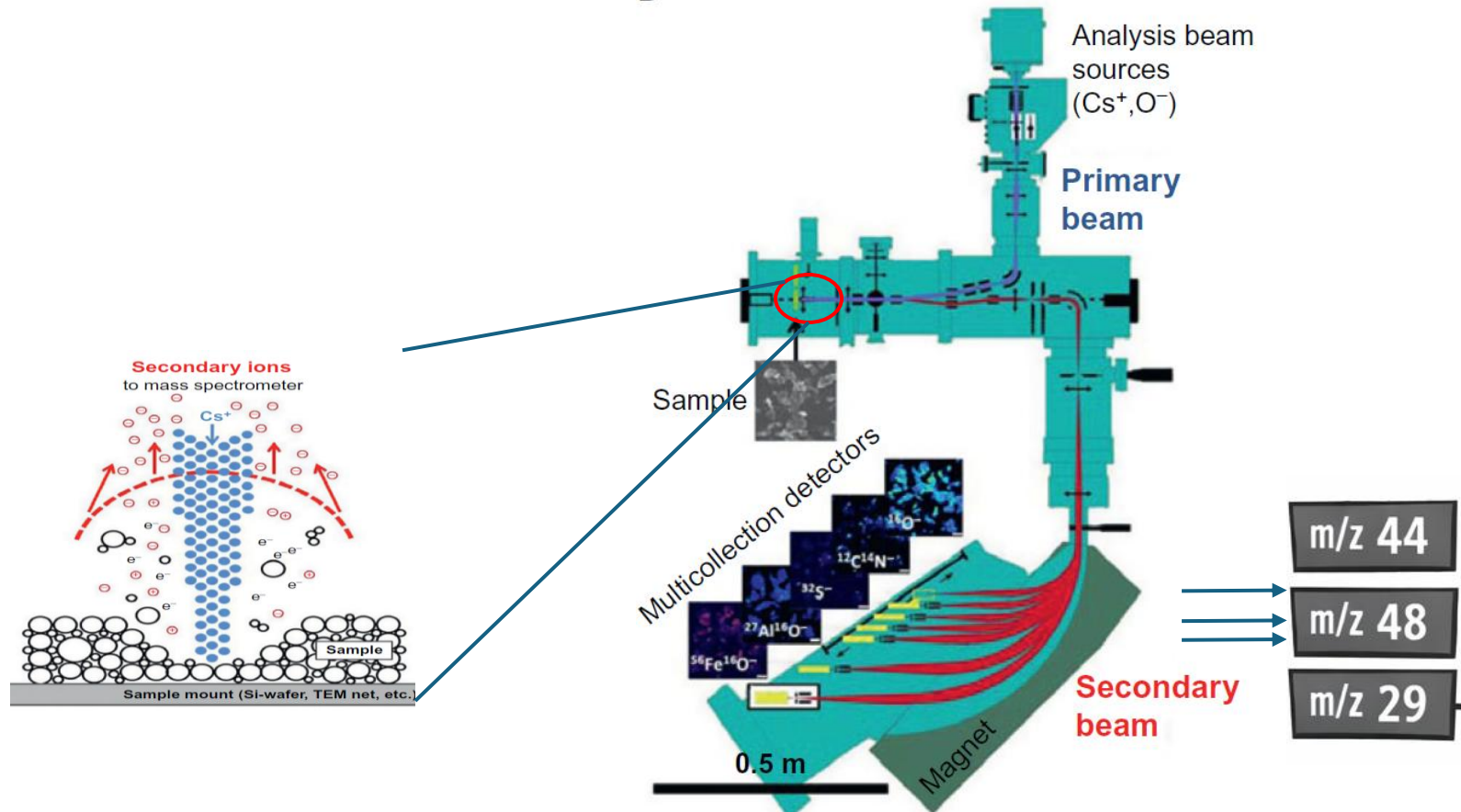
3. Techniques analytiques

Analyseur élémentaire (EA) couplé à un spectromètre de masse à rapport isotopique (IRMS)



3. Techniques analytiques

Nanoscale secondary ion mass spectrometry (NanoSIMS)



Mueller et al. (2013)

4. Approches isotopiques et leurs applications

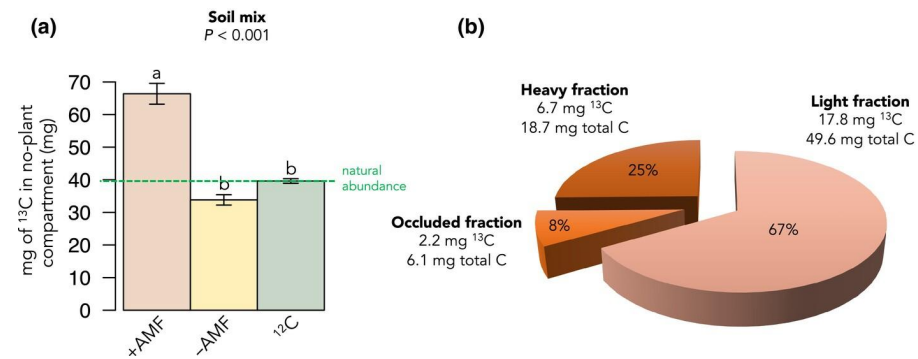
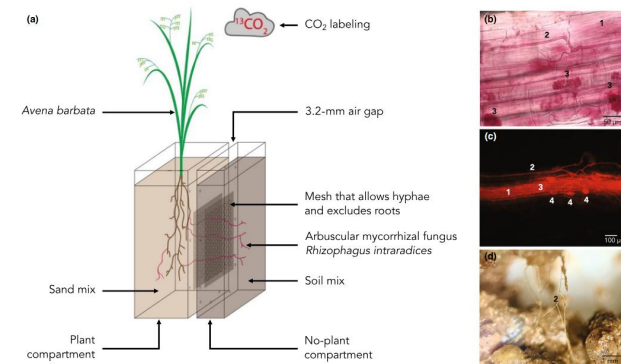
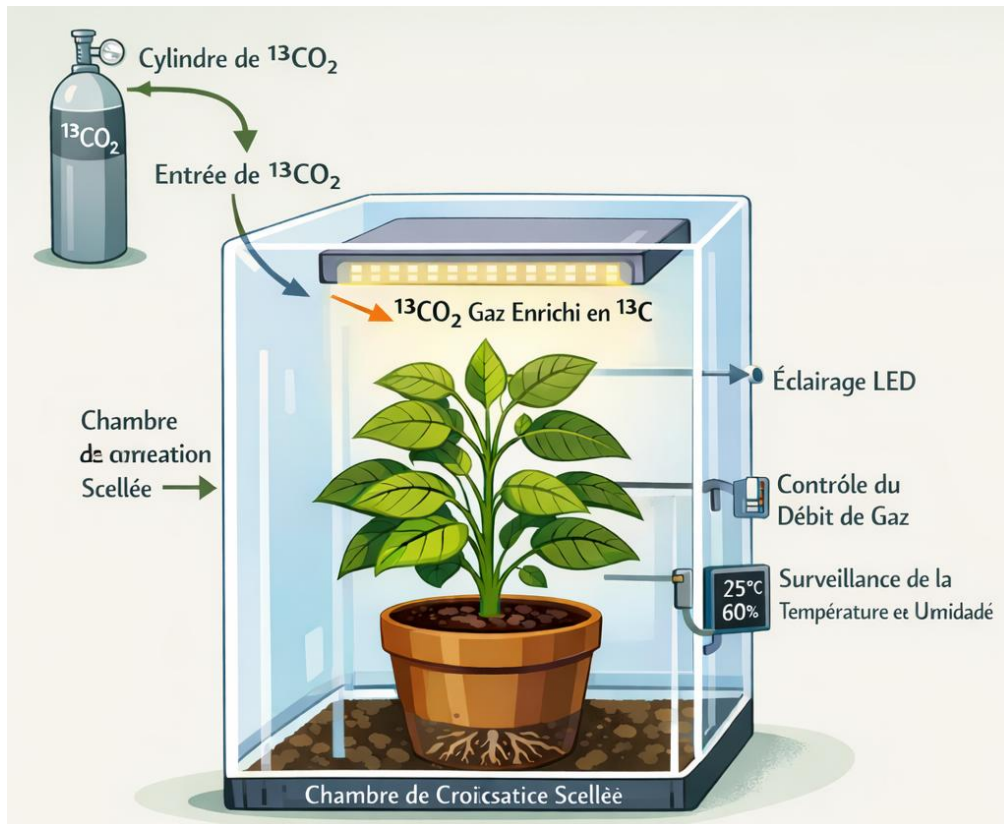
Trois approches principales :

- I. Marquage isotopique continu
- II. Marquage isotopique par impulsion (la plus utilisée actuellement)
- III. Abondance naturelle

4. Approches isotopiques et leurs applications

Marquage isotopique continu : $\delta^{13}\text{C}$

Exposition continue au $^{13}\text{CO}_2$ tout au long de la croissance de la plante



Kakouridis et al. (2024)

4. Approches isotopiques et leurs applications

Marquage isotopique continu : $\delta^{13}\text{C}$

Avantages

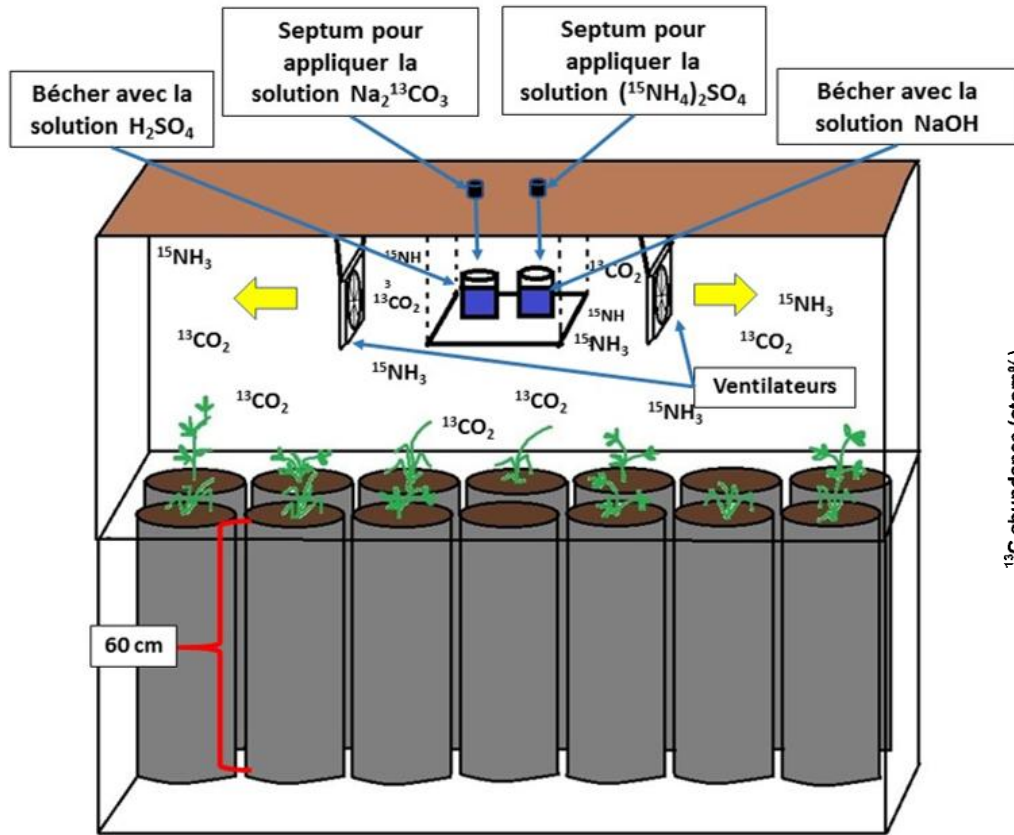
- Quantification précise du C assimilé et transféré au sol
- Marquage homogène dans toute la plante
- Matériau très riche en ^{13}C

Limites

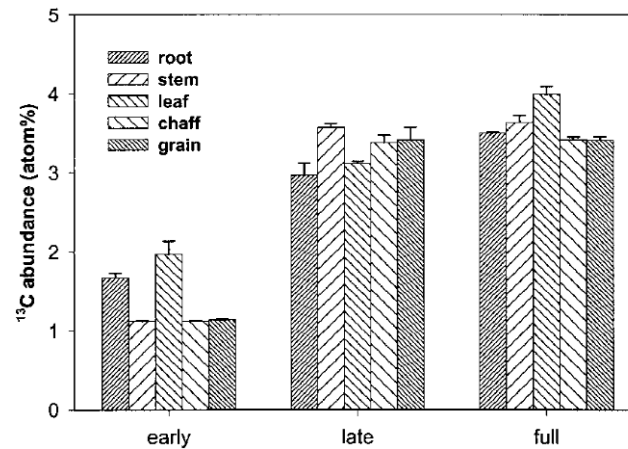
- Équipement complexe et coûteux
- Conditions expérimentales strictes (T° , humidité, CO_2)

4. Approches isotopiques et leurs applications

Marquage isotopique par impulsion : $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$



Exposition brève (quelques heures) et ponctuelle au $^{13}\text{CO}_2$ et au $^{15}\text{NH}_3$ au cours du développement de la plante



Bromand et al. (2001)

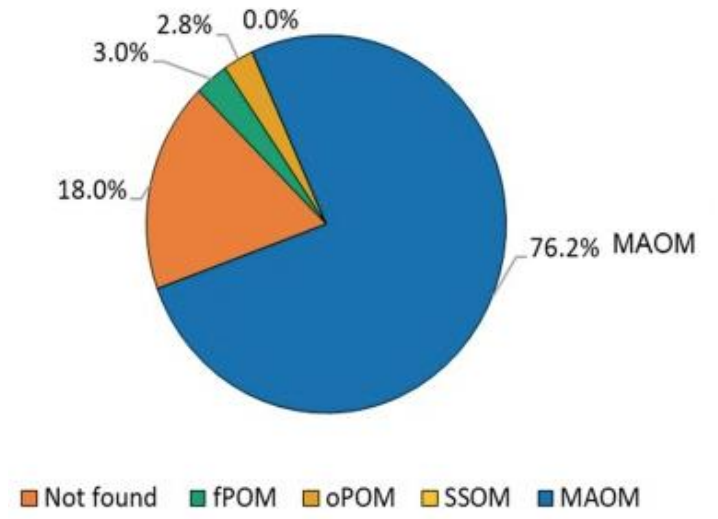
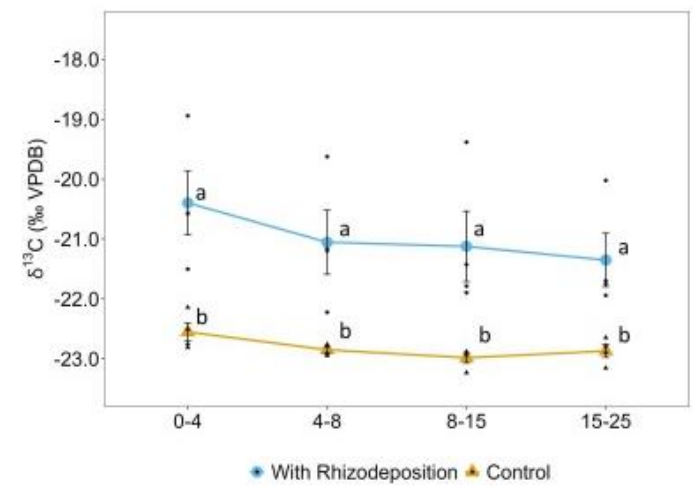
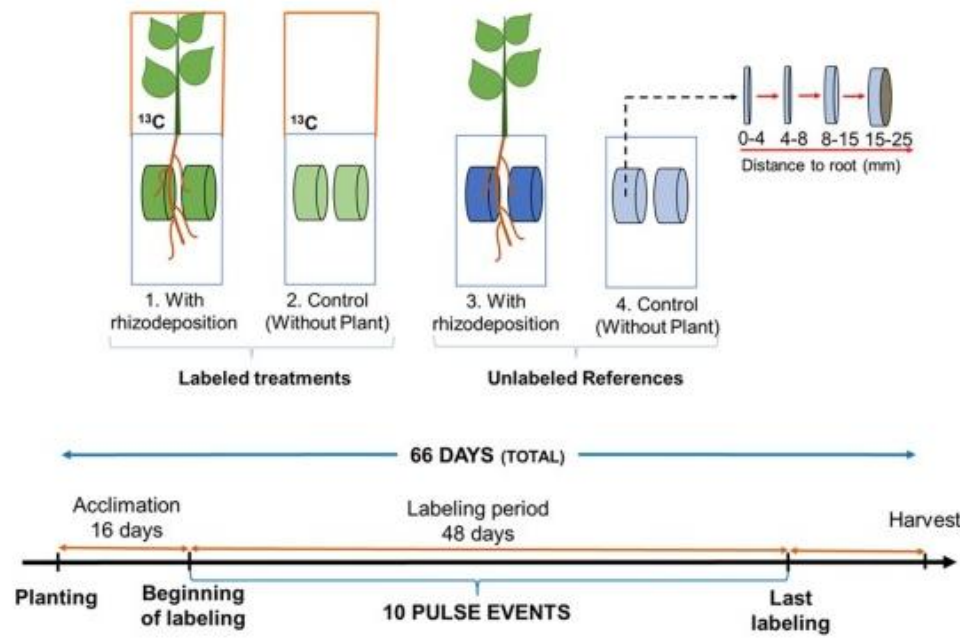
N rate (mg kg^{-1} soil)	Component	Plant-derived N	
		mg	% of total
0	Shoot	8.2	56
	Root	2.8	19
	Rhizo-soil*	1.9	13
	Bulk soil	1.7	12
40	Shoot	16.3	47
	Root	7.5	22
	Rhizo-soil*	6.1	18
	Bulk soil	4.7	14

*Soil adhering to roots which, upon separation, included some root materials.

Janzen et Bruinsma (1989)

4. Approches isotopiques et leurs applications

Marquage isotopique par impulsion : $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$



Teixeira et al. (2024)

4. Approches isotopiques et leurs applications

Marquage isotopique par impulsion : $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$

Avantages

- Méthode simple et flexible
- Permet d'étudier la distribution récente des photosynthétats
- Permet un suivi temporel fin du devenir du C
- Marquage uniforme s'il est appliqué de façon espacée sur toute la croissance

Limites

- Quantité totale de C assimilé inconnue (approximation)
- Résultats dépendants du stade de développement au moment du pulse
- **En général**, les matériaux sont moins riches en ^{13}C qu'en marquage continu

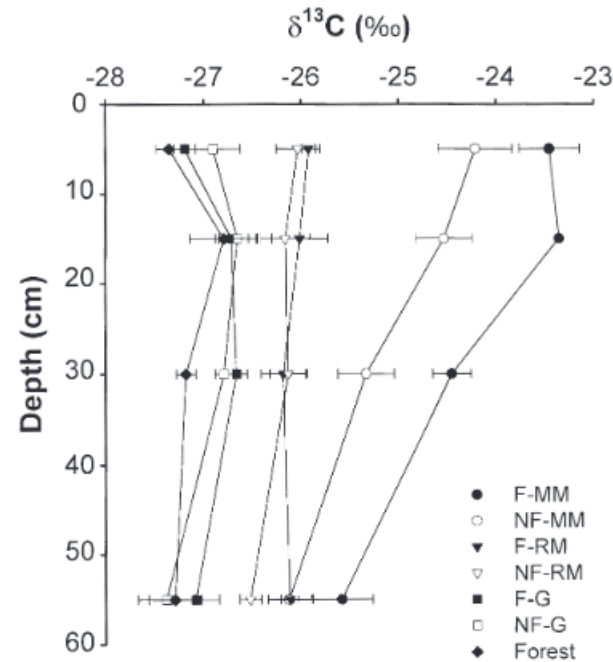
4. Approches isotopiques et leurs applications

Abondance naturelle: $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$



Plantes C3 → C4

Augmentation du $\delta^{13}\text{C}$ dans le sol



Depth (cm)	Monoculture maize		Rotation maize	
	Fertilized	Unfertilized	Fertilized	Unfertilized
<i>Maize-derived C (Mg ha⁻¹ yr⁻¹)</i>				
0–20	0.40	0.26	0.45	0.39
20–70	0.26	0.14	0.48	0.39
<i>Maize residue returned to soil (Mg ha⁻¹ yr⁻¹)</i>				
0–20	4.11	2.51	5.59	4.84
20–70	0.52	0.35	0.95	0.98
<i>Mg Maize-derived C/Mg maize residue C returned</i>				
0–20	0.10	0.11	0.08	0.08
20–70	0.49	0.39	0.51	0.40

Gregorich et al. (2001)

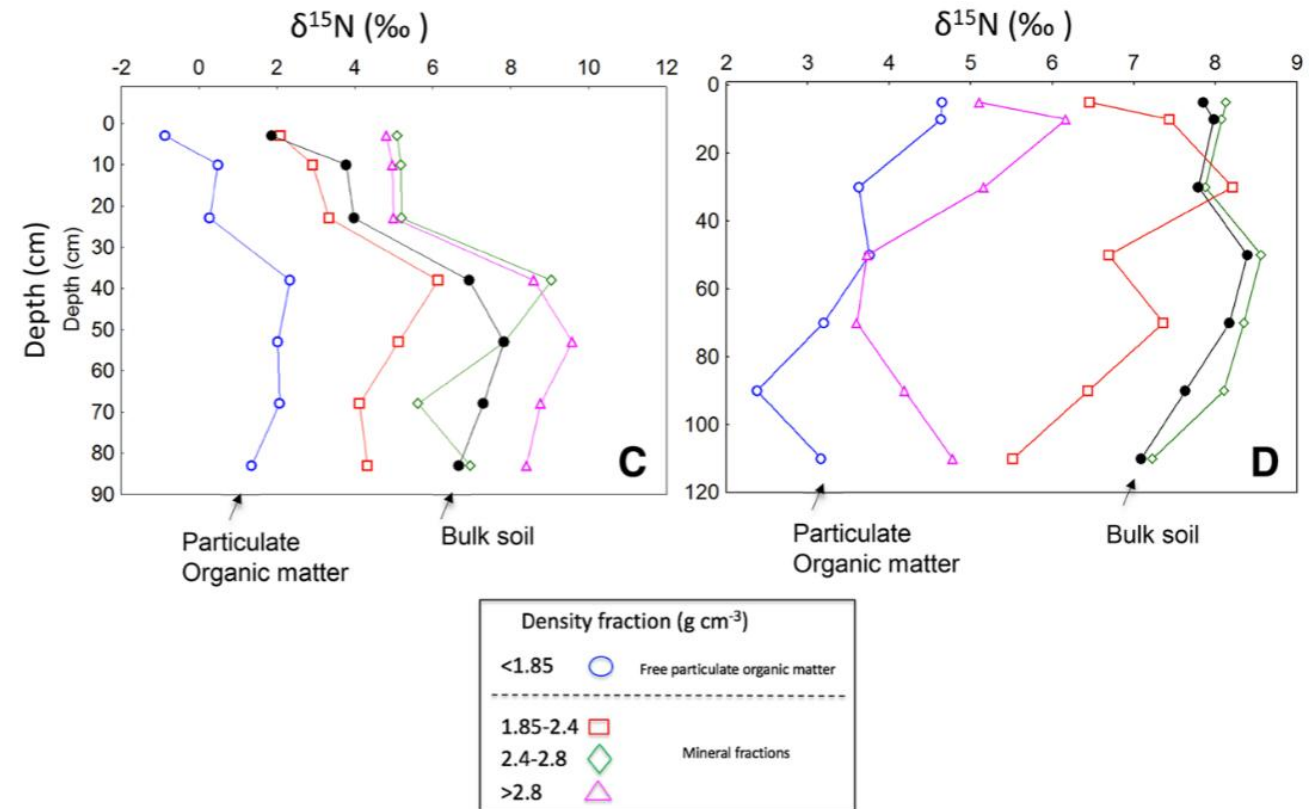
4. Approches isotopiques et leurs applications

Abondance naturelle: $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$

Ces techniques reposent principalement sur le fractionnement du ^{15}N au cours du processus de biotransformation



Chaque fois qu'il y a une perte de N (gaz ou lessivage), ce qui reste dans le sol a tendance à devenir plus riche en ^{15}N ($\delta^{15}\text{N} \uparrow$)



Kramer et al. (2017)

4. Approches isotopiques et leurs applications

Abondance naturelle : $\delta^{13}\text{C}$ (basée sur des plantes C3 et C4)

Avantages

- Méthode naturelle (non invasive) : ne nécessite aucun enrichissement artificiel
- Adaptée aux conditions de champ : aucune serre ni système spécifique n'est installé
- Marquage continu du sol : représentativité au fil du temps

Limites

- Dépendance aux systèmes C3 vs C4 : nécessite un changement de végétation (situation peu naturelle)
- Application restreinte : utilisable uniquement dans des contextes climatiques où C3 et C4 peuvent être comparés
- Faible résolution isotopique : différences de $\delta^{13}\text{C}$ relativement limitées
- Exigence analytique élevée : nécessite une spectrométrie de masse très sensible

4. Approches isotopiques et leurs applications

Incubation de matériel enrichi en ^{13}C et en ^{15}N (fraction MOAM)

Incubation (51 days)

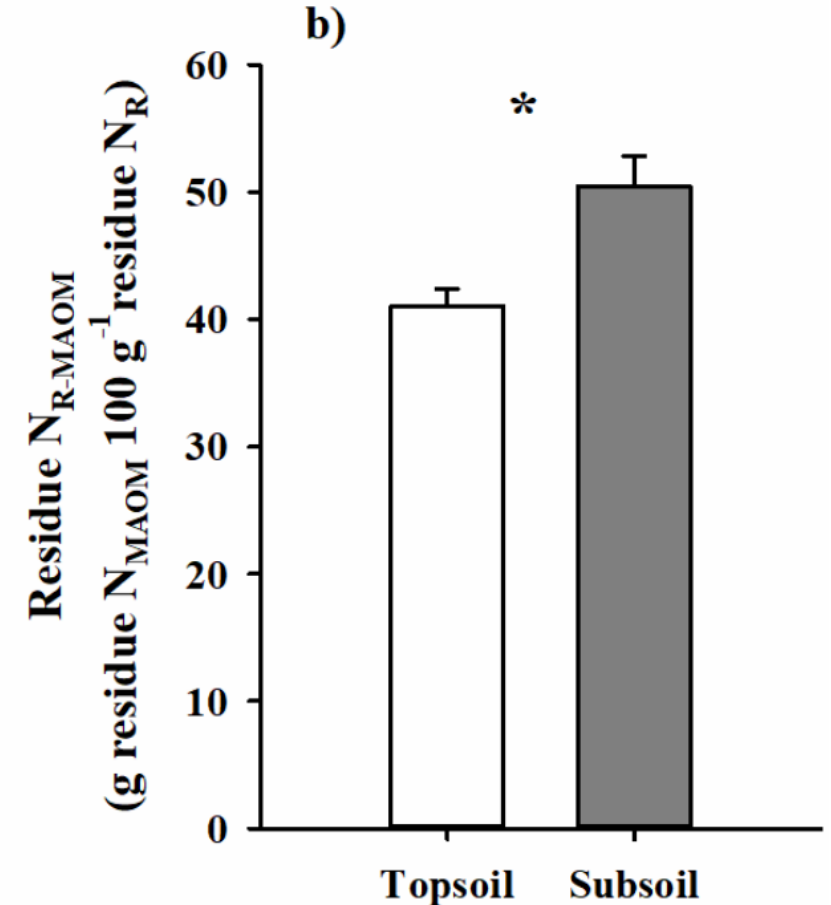
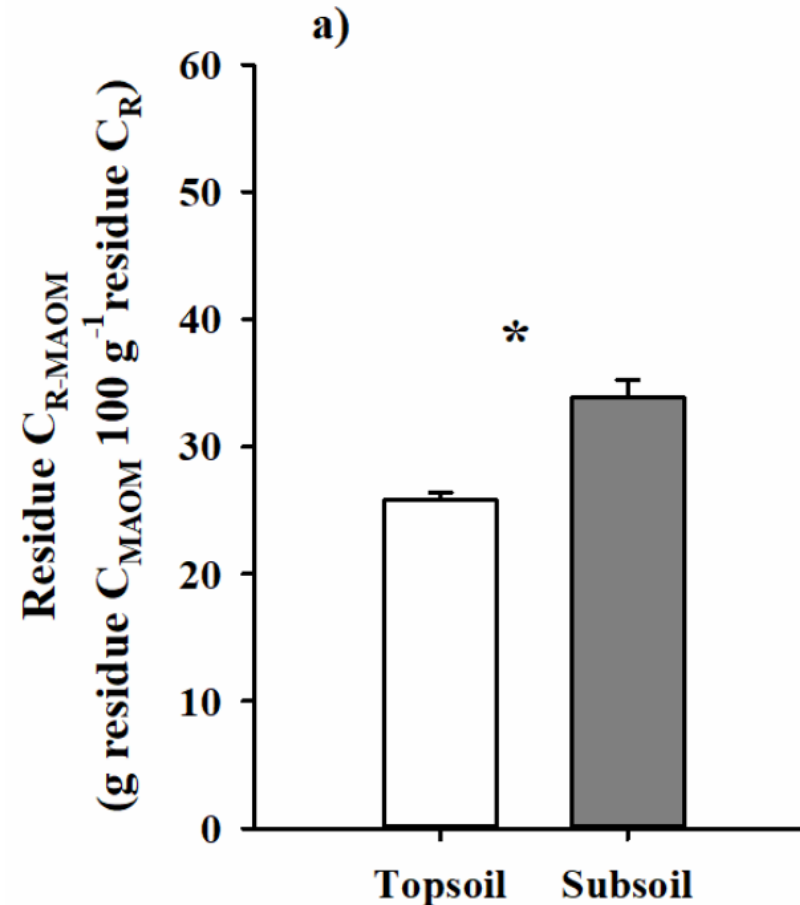
^{13}C - and ^{15}N -
labeled residue

Soil



Zea mays

- Topsoil and subsoil
- Sieved to <6 mm

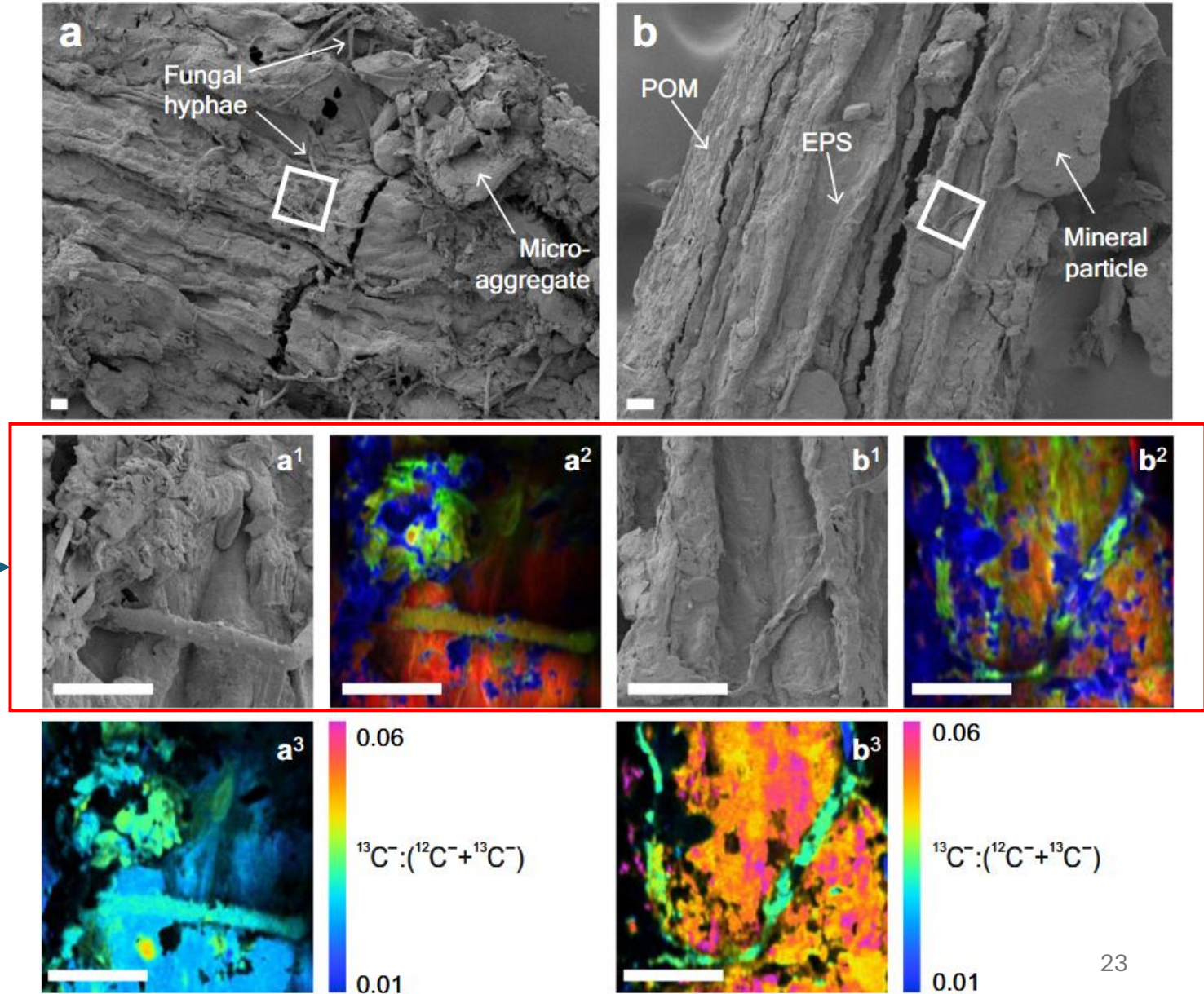


4. Approches isotopiques et leurs applications

NanoSIMS (Nanoscale secondary ion mass spectrometry)

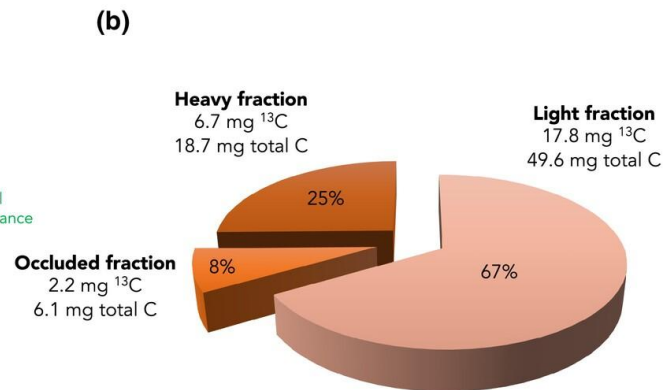
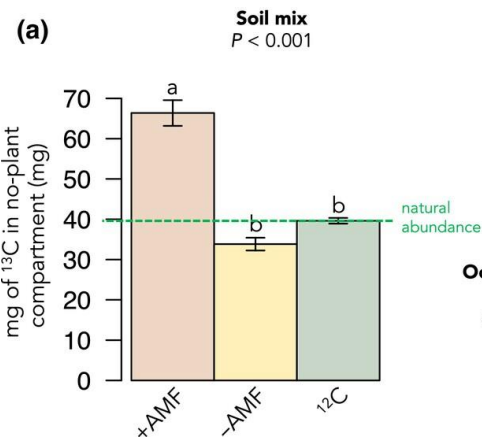
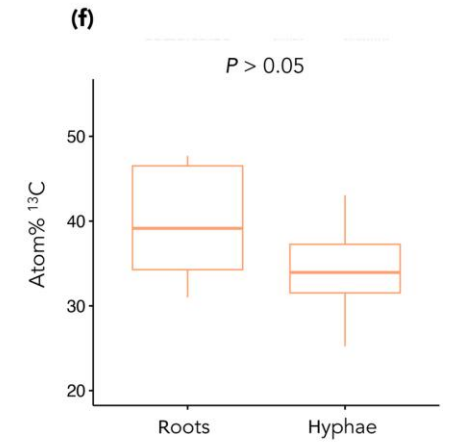
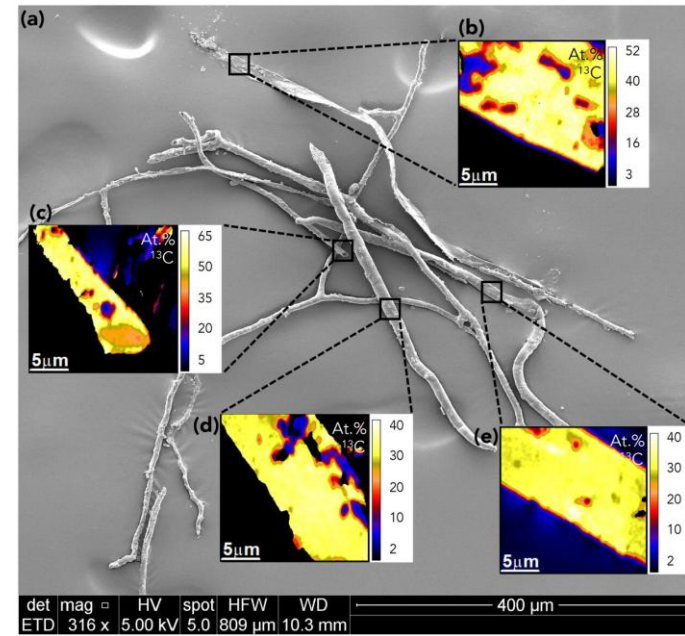
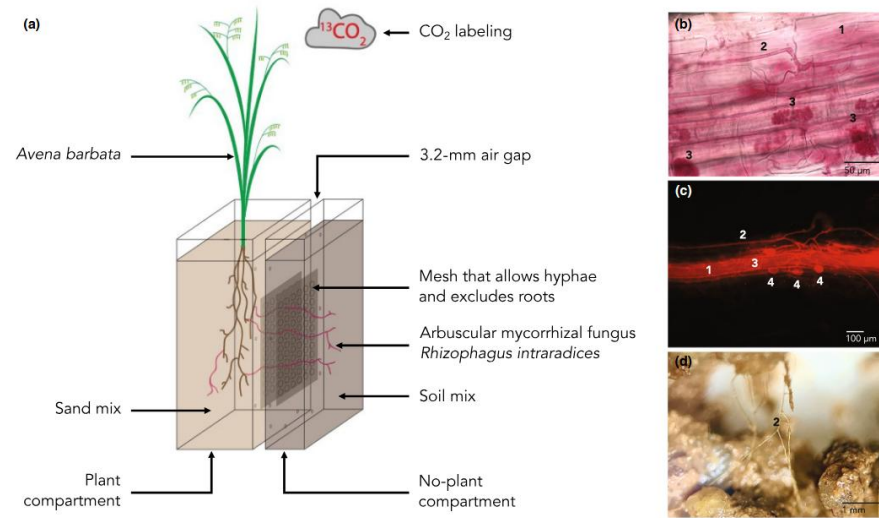
Carte composite NanoSIMS :
 ^{12}C (rouge), ^{14}N (vert), ^{16}O (bleu)

Witzgall et al. (2021)



4. Approches isotopiques et leurs applications

NanoSIMS (Nanoscale secondary ion mass spectrometry)



Kakouridis et al. (2024)

4. Approches isotopiques et leurs applications

NanoSIMS (Nanoscale secondary ion mass spectrometry)

Avantages	Inconvénients
Très haute résolution spatiale (~50–100 nm)	Équipement très coûteux et rare (environ 50 à 60 instruments NanoSIMS dans le monde)
Cartographie isotopique à l'échelle subcellulaire	Préparation d'échantillons complexe (résine, polissage)
Détection sensible des isotopes stables (^{13}C , ^{15}N ...)	Seule une petite surface est analysée
Permet de localiser les “hotspots” biogéochimiques	Données complexes à traiter et interpréter
Combine information chimique et spatiale	Instrument destructif
Idéal pour étudier interactions microbe–minéral	

5. Conclusion et perspectives

Messages à retenir

- I. Isotopes stables = tracer puissant de la MOS
- II. Il y a différentes techniques et approches
- III. Chaque approche présente des avantages et des limites ; le choix dépend des objectifs et des questions de recherche
- IV. Les approches évoluent rapidement, avec une tendance croissante au couplage de techniques complémentaires afin de mieux comprendre les processus étudiés
- V. De nombreuses autres techniques n'ont pas été abordées dans cette présentation

Merci beaucoup pour votre attention !

Des questions ?

Références

- Blumenshine, S., Piumsomboon, A., Guunbua, V., & Paphavasit, N. (2007). Factors affecting spatial and temporal variations in water quality and plankton: Case study in the Bangpakong River. *Journal of Scientific Research (Section T)*, 6, 11-27
- Bromand, S., Whalen, J. K., Janzen, H. H., Schjoerring, J. K., & Ellert, B. H. (2001). A pulse-labelling method to generate ¹³C-enriched plant materials. *Plant and soil*, 235(2), 253-257.
- Cotrufo, M. F., & Lavelle, J. M. (2022). Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. *Advances in agronomy*, 172, 1-66.
- González Ramón, A., Irazabal, N., Les, J., Ferrer, R., Olid, N., Gainza, I., ... & Uriarte, U. (2012). El karst del Parque Nacional de Haitises (República Dominicana).
- Gregorich, E. G., Drury, C. F., & Baldock, J. A. (2001). Changes in soil carbon under long-term maize in monoculture and legume-based rotation. *Canadian journal of soil science*, 81(1), 21-31
- Janzen, H. H., & Bruinsma, Y. (1989). Methodology for the quantification of root and rhizosphere nitrogen dynamics by exposure of shoots to ¹⁵N-labelled ammonia. *Soil Biology and Biochemistry*, 21(2), 189-196
- Kakouridis, A., Yuan, M., Nuccio, E. E., Hagen, J. A., Fossum, C. A., Moore, M. L., ... & Firestone, M. K. (2024). Arbuscular mycorrhiza convey significant plant carbon to a diverse hyphosphere microbial food web and mineral-associated organic matter. *New Phytologist*, 242(4), 1661-1675
- Kramer, M. G., Lajtha, K., & Aufdenkampe, A. K. (2017). Depth trends of soil organic matter C: N and ¹⁵N natural abundance controlled by association with minerals. *Biogeochemistry*, 136(3), 237-248
- Kuzyakov, Y., & Domanski, G. (2000). Carbon input by plants into the soil. Review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 163(4), 421-431.
- Magdoff, F., & Weil, R. R. (2004). *Soil organic matter in sustainable agriculture*. CRC press
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., ... & Winowiecki, L. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59-86
- Mueller, C. W., Kölbl, A., Hoeschen, C., Hillion, F., Heister, K., Herrmann, A. M., & Kögel-Knabner, I. (2012). Submicron scale imaging of soil organic matter dynamics using NanoSIMS—from single particles to intact aggregates. *Organic geochemistry*, 42(12), 1476-1488
- Pellerin, S., Bamière, L., Launay, C., Martin, R., Schiavo, M., Angers, D., ... & Rechauchère, O. (2020). Stocker du carbone dans les sols français. Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût? (Doctoral dissertation, INRA)
- Poirier, V., Angers, D. A., Rochette, P., & Whalen, J. K. (2013). Initial soil organic carbon concentration influences the short-term retention of crop-residue carbon in the fine fraction of a heavy clay soil. *Biology and Fertility of Soils*, 49(5), 527-535
- Poirier, V., Basile-Doelsch, I., Balesdent, J., Borschneck, D., Whalen, J. K., & Angers, D. A. (2020). Organo-mineral interactions are more important for organic matter retention in subsoil than topsoil. *Soil Systems*, 4(1), 4.
- Roberts A. 2016. Determination of the stable isotopic signature and concentration of Dissolved Organic Carbon along a continuum from riverine to oceanic conditions.
- Teixeira, P. P., Vidal, A., Teixeira, A. P., Souza, I. F., Hurtarte, L. C., Silva, D. H., ... & Silva, I. R. (2024). Decoding the rhizodeposit-derived carbon's journey into soil organic matter. *Geoderma*, 443, 116811.
- Thomas, J., & Rose, T. (2003). Environmental isotopes in hydrogeology. *Environmental Earth Sciences*, 43(5), 532
- Witzgall, K., Vidal, A., Schubert, D. I., Hoeschen, C., Schweizer, S. A., Buegger, F., ... & Mueller, C. W. (2021). Particulate organic matter as a functional soil component for persistent soil organic carbon. *Nature communications*, 12(1), 4115