

C-STABILITY: étude la dynamique du carbone des sols basée sur une représentation continue de la matière organique et fonctionnelle des décomposeurs

Présentation du modèle et processus d'intégration dans Capsis

J. Sainte-Marie¹, M. Barrandon ², L. Saint-André ³, E. Gelhaye ⁴, F. Martin ^{4,5} et D. Derrien ³

Journées FOREM 2022 - Orléans - du 22 au 24/03/2022

¹Silva, Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAe, Nancy, France

²IECL, Université de Lorraine, CNRS, Nancy, France

³BEF, INRAe, Nancy, France

⁴IAM, Université de Lorraine, INRAe, Nancy, France

⁵BAICFTBMD, Beijing Forestry University, Beijing, China

Contexte

Les sols sont

- le plus grand réservoir de carbone terrestre.
- fortement impacts par les activités humaines (climage et usage des terres)
- perçus comme un élément clé pour l'atténuation du changement climatique en augmentant la quantité globale de matière organique (MO) présente dans les sols (IPCC, 2019).

Evaluer la dynamique de la matière organique (MOS) dans des sols en transition est un défi majeur compte tenu de l'évolution en cours du climat (IPCC, 2021).

Quelques questions-type...

- Quel est l'impact d'un changement brutal d'usage d'un sol? Par exemple si je remplace une prairie par une forêt?
- Comment analyser et prédire des changements plus progressifs? (changement des aires de répartition des essences, température, CO₂)?

Les sols sont

- le plus grand réservoir de carbone terrestre.
- fortement impacts par les activités humaines (climage et usage des terres)
- perçus comme un élément clé pour l'atténuation du changement climatique en augmentant la quantité globale de matière organique (MO) présente dans les sols (IPCC, 2019).

Evaluer la dynamique de la matière organique (MOS) dans des sols en transition est un défi majeur compte tenu de l'évolution en cours du climat (IPCC, 2021).

Quelques questions-type...

- Quel est l'impact d'un changement brutal d'usage d'un sol? Par exemple si je remplace une prairie par une forêt?
- Comment analyser et prédire des changements plus progressifs? (changement des aires de répartition des essences, température, CO₂)?

Dynamique de la MO du sol: un système régulé par des processus complexes en interactions

- provient d'une structure végétal complexe (biochimie, polymérisation, organisation spatiale)
- activité microbienne (biotransformation, successions)
- processus de dépolymérisation/défunctionalisation par les enzymes,
- processus de stabilisation (associations organo-minérales, aggrégation...)

L'ensemble de ces processus étant par ailleurs dépendants de la température, du pH, de la composition du sol, de la biodisponibilité en nutriments, humidity...

Les sols sont des systèmes extrêmement complexes et leur évolution est difficile à prédire dans un environnement changeant.

Dynamique de la MO du sol: un système régulé par des processus complexes en interactions

- provient d'une structure végétal complexe (biochimie, polymérisation, organisation spatiale)
- activité microbienne (biotransformation, successions)
- processus de dépolymérisation/défunctionalisation par les enzymes,
- processus de stabilisation (associations organo-minérales, aggrégation...)

L'ensemble de ces processus étant par ailleurs dépendants de la température, du pH, de la composition du sol, de la biodisponibilité en nutriments, humidity...

Les sols sont des systèmes extrêmement complexes et leur évolution est difficile à prédire dans un environnement changeant.

Dynamique de la MO du sol: un système régulé par des processus complexes en interactions

- provient d'une structure végétal complexe (biochimie, polymérisation, organisation spatiale)
- activité microbienne (biotransformation, successions)
- processus de dépolymérisation/défunctionalisation par les enzymes,
- processus de stabilisation (associations organo-minérales, aggrégation...)

L'ensemble de ces processus étant par ailleurs dépendants de la température, du pH, de la composition du sol, de la biodisponibilité en nutriments, humidity...

Les sols sont des systèmes extrêmement complexes et leur évolution est difficile à prédire dans un environnement changeant.

Un changement de paradigme

La persistance de la MO dans les sols a longtemps été considérée comme une conséquence de sa "récalcitrance" intrinsèque au processus de dégradation.

Les innovations techniques récentes ont considérablement changé la compréhension de la dynamique de la MO des sols :

- **Biogéochimie:** La MO est désormais perçue comme un ensemble de polymères décomposés en molécules de plus en plus petites par les enzymes des décomposeurs. La longueur des polymères régule notamment le prélèvement de MO par les décomposeurs.
- **L'écologie microbienne** a considérablement évolué dans la description de la diversité fonctionnelle des décomposeurs et leur rôle dans le cycle de la MO des sols. L'analyse génomique permet de regrouper les décomposeurs en familles fonctionnelles (guilde - réduction de la complexité) et l'analyse des sécrétomes identifie les enzymes produites par les décomposeurs.

Ce nouveau paradigme impacte fortement les modèles prédictifs existants car leurs formalismes ne sont pas adaptés pour intégrer l'ensemble des nouvelles connaissances.

Un changement de paradigme

La persistance de la MO dans les sols a longtemps été considérée comme une conséquence de sa "récalcitrance" intrinsèque au processus de dégradation.

Les innovations techniques récentes ont considérablement changé la compréhension de la dynamique de la MO des sols :

- **Biogéochimie**: La MO est désormais perçue comme un ensemble de polymères décomposés en molécules de plus en plus petites par les enzymes des décomposeurs. La longueur des polymères régule notamment le prélèvement de MO par les décomposeurs.
- **L'écologie microbienne** a considérablement évolué dans la description de la diversité fonctionnelle des décomposeurs et leur rôle dans le cycle de la MO des sols. **L'analyse génomique** permet de regrouper les décomposeurs en familles fonctionnelles (guilde - réduction de la complexité) et **l'analyse des sécrétomes** identifie les enzymes produites par les décomposeurs.

Ce nouveau paradigme impacte fortement les modèles prédictifs existants car leurs formalismes ne sont pas adaptés pour intégrer l'ensemble des nouvelles connaissances.

Un changement de paradigme

La persistance de la MO dans les sols a longtemps été considérée comme une conséquence de sa "récalcitrance" intrinsèque au processus de dégradation.

Les innovations techniques récentes ont considérablement changé la compréhension de la dynamique de la MO des sols :

- **Biogéochimie:** La MO est désormais perçue comme un ensemble de polymères décomposés en molécules de plus en plus petites par les enzymes des décomposeurs. La longueur des polymères régule notamment le prélèvement de MO par les décomposeurs.
- **L'écologie microbienne** a considérablement évolué dans la description de la diversité fonctionnelle des décomposeurs et leur rôle dans le cycle de la MO des sols. **L'analyse génomique** permet de regrouper les décomposeurs en familles fonctionnelles (guilde - réduction de la complexité) et **l'analyse des sécrétomes** identifie les enzymes produites par les décomposeurs.

Ce nouveau paradigme impacte fortement les modèles prédictifs existants car leurs formalismes ne sont pas adaptés pour intégrer l'ensemble des nouvelles connaissances.

Un changement de paradigme

La persistance de la MO dans les sols a longtemps été considérée comme une conséquence de sa "récalcitrance" intrinsèque au processus de dégradation.

Les innovations techniques récentes ont considérablement changé la compréhension de la dynamique de la MO des sols :

- **Biogéochimie**: La MO est désormais perçue comme un ensemble de polymères décomposés en molécules de plus en plus petites par les enzymes des décomposeurs. La longueur des polymères régule notamment le prélèvement de MO par les décomposeurs.
- **L'écologie microbienne** a considérablement évolué dans la description de la diversité fonctionnelle des décomposeurs et leur rôle dans le cycle de la MO des sols. **L'analyse génomique** permet de regrouper les décomposeurs en familles fonctionnelles (gilde - réduction de la complexité) et **l'analyse des sécrétomes** identifie les enzymes produites par les décomposeurs.

Ce nouveau paradigme impacte fortement les modèles prédictifs existants car leurs formalismes ne sont pas adaptés pour intégrer l'ensemble des nouvelles connaissances.

Un changement de paradigme

La persistance de la MO dans les sols a longtemps été considérée comme une conséquence de sa "récalcitrance" intrinsèque au processus de dégradation.

Les innovations techniques récentes ont considérablement changé la compréhension de la dynamique de la MO des sols :

- **Biogéochimie**: La MO est désormais perçue comme un ensemble de polymères décomposés en molécules de plus en plus petites par les enzymes des décomposeurs. La longueur des polymères régule notamment le prélèvement de MO par les décomposeurs.
- **L'écologie microbienne** a considérablement évolué dans la description de la diversité fonctionnelle des décomposeurs et leur rôle dans le cycle de la MO des sols. **L'analyse génomique** permet de regrouper les décomposeurs en familles fonctionnelles (gilde - réduction de la complexité) et **l'analyse des sécrétomes** identifie les enzymes produites par les décomposeurs.

Ce nouveau paradigme impacte fortement les modèles prédictifs existants car leurs formalismes ne sont pas adaptés pour intégrer l'ensemble des nouvelles connaissances.

Modèles compartimentaux/fonctionnels

Forces

- physiologie des décomposeurs (CUE, taux de croissance et de mortalité...)
- propriétés des enzymes extra-cellulaires (taux de production, propriétés catalytiques...)
- porosité du sol et rôle de la micro-architecture sur l'accessibilité
- description des processus permettant de simuler un environnement changeant.

Faiblesses

- pas de représentation continue - supposent que la MO peut être représentée par quelques pools discrets avec différents taux de renouvellement
- plus le système est complexe (augmentation de la description des composés et des processus), plus le modèle est sujet à une inflation du nombre de paramètres et de l'incertitude dans les prédictions surtout à long terme

Quelles limites pour les modèles?

Modèles de qualité (continus)

Forces

- représente la MO comme une distribution continue suivant un axe de qualité
- décrit avec peu de paramètres comment la qualité de la MO évolue
- forte capacité pour prédire l'évolution des systèmes stables
- formalisme innovant dans le contexte des sciences du sol: équations intégrées-différentielles i.e. $\frac{dC}{dt}(q, t) \sim \int C(q, t) dq$ (les changements locaux de la distributions peuvent être influencés par le comportement global du système).

Faiblesses

- pas de description détaillée des mécanismes microbiens et biogéochimiques
- la qualité est une propriété intrinsèque de la MO (notion de récalcitrance)
- considère un unique groupe uniforme de décomposeurs à l'état stationnaire
- la qualité est un concept complexe et non mesurable
- pas de description explicite des processus fonctionnels - faible capacité prédictive pour les systèmes perturbés

C-STABILITY




ARTICLE



<https://doi.org/10.1038/s41467-021-21079-6>

OPEN

C-STABILITY an innovative modeling framework to leverage the continuous representation of organic matter

Julien Sainte-Marie ^{1,2}, Matthieu Barrandon³, Laurent Saint-André², Eric Gelhaye⁴, Francis Martin^{4,5} & Delphine Derrien²

C-STABILITY propose de dépasser les limitations des modèles actuels en synthétisant les différentes connaissances émergent à l'interface des sciences du sol et de la microbiologie.

La représentation continue émerge du nombre élevé de molécules



Action ciblée des décomposeurs

- En fonction de la longueur des polymères
- Prélèvement ciblé des microbes
- Dépolymerisation ciblée des enzymes

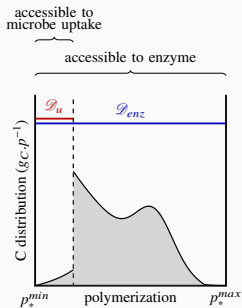
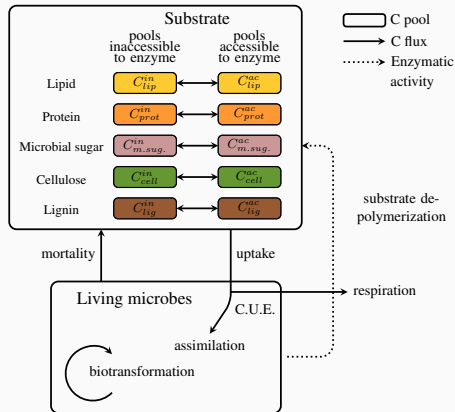
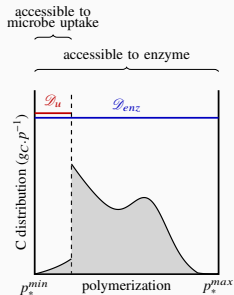


Schéma du modèle

a C-STABILITY conceptual diagram



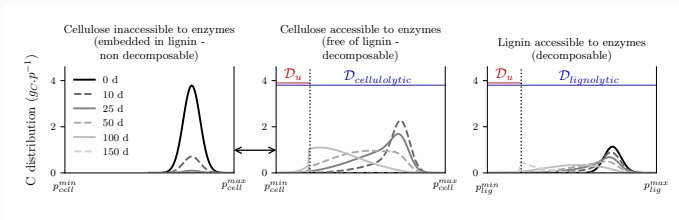
b Substrate polymerization description for an accessible pool



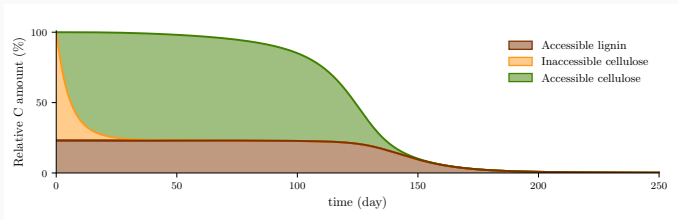
Exemples d'application

L'action coordonnée des enzymes régule l'accessibilité du substrat

a Changes in polymerization distribution in cellulose and lignin pools



b Variations in C stocks over time in cellulose and lignin pools

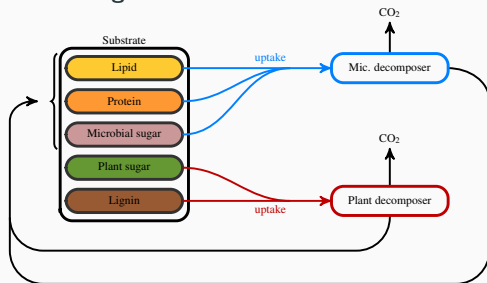


L'action coordonnée des enzymes régule l'accessibilité du substrat

Video link: [▶ Link](#)

La succession des communautés impacte la persistance de la MO

No-cheating



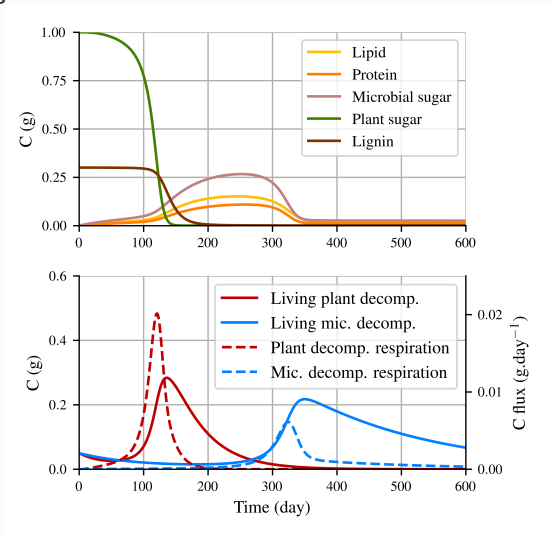
Décomposeurs de microbes plus compétitifs que les décomposeurs de plantes (CUE plus élevée, mortalité plus faible). Les deux communautés ont la même signature biochimique.

Deux communautés de décomposeurs

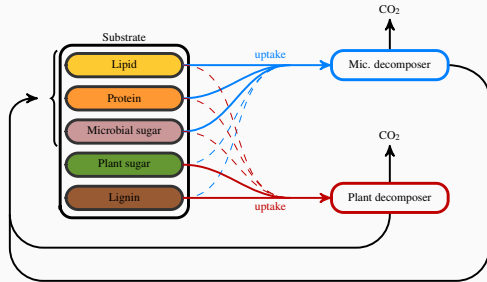
- Décomposeurs de plantes
 - depolymerases de sucres végétaux
 - oxidasés de la lignine
- Décomposeurs de microbes
 - depolymerases des lipides
 - proteases
 - depolymerases des sucres microbiens

La succession des communautés impacte la persistance de la MO

No-cheating

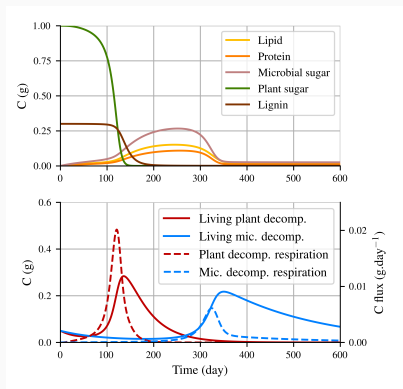


Cheating

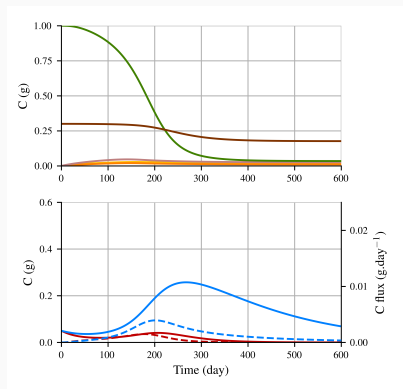


La succession des communautés impacte la persistance de la MO

No-Cheating



Cheating



Conclusions

Un "toy model" puissant qui assemble les connaissances actuelles

- C-STABILITY tient compte (i) du continuum de formes des polymères, (ii) de la diversité fonctionnelle microbienne, (iii) processus clé du sol dans le cycle de la MO t.q. l'accessibilité selective et la dépolymerisation des substrats.
- La description de la chimie de la MO et de l'activité catabolique des décomposeurs est une force pour renforcer la compréhension des mécanismes de décomposition et de stockage.
- C-STABILITY est une plateforme permettant d'identifier les points de blocage des connaissances, d'accompagner les interactions entre les sciences du sol et les microbiologistes, et de stimuler les discussions sur les contrôles mécanistiques du cycle de la MO des sols.
- La structure flexible de C-STABILITY est ouverte à de nouveaux développements pour explorer de nouvelles hypothèses mécanistiques (compétition des décomposeurs, limitation en eau et en nutriments, agrégation...) et soutenir la conception de futures expériences (sols "naturels", technosols, bioréacteurs...).

Un "toy model" puissant qui assemble les connaissances actuelles

- C-STABILITY tient compte (i) du **continuum de formes des polymères**, (ii) de la **diversité fonctionnelle microbienne**, (iii) processus clé du sol dans le cycle de la MO t.q. **l'accessibilité selective et la dépolymerisation des substrats**.
- La description de la chimie de la MO et de l'activité catabolique des décomposeurs est une force pour renforcer la compréhension des mécanismes de décomposition et de stockage.
- C-STABILITY est une plateforme permettant d'identifier les points de blocage des connaissances, d'accompagner les interactions entre les sciences du sol et les microbiologistes, et de stimuler les discussions sur les contrôles mécanistiques du cycle de la MO des sols.
- La structure flexible de C-STABILITY est ouverte à de nouveaux développements pour explorer de nouvelles hypothèses mécanistiques (compétition des décomposeurs, limitation en eau et en nutriments, agrégation...) et soutenir la conception de futures expériences (sols "naturels", technosols, bioréacteurs...).

Un "toy model" puissant qui assemble les connaissances actuelles

- C-STABILITY tient compte (i) du **continuum de formes des polymères**, (ii) de la **diversité fonctionnelle microbienne**, (iii) processus clé du sol dans le cycle de la MO t.q. **l'accessibilité selective et la dépolymerisation des substrats**.
- La description de la chimie de la MO et de l'activité catabolique des décomposeurs est une force pour renforcer la compréhension des mécanismes de décomposition et de stockage.
- C-STABILITY est une plateforme permettant d'identifier les points de blocage des connaissances, d'accompagner les interactions entre les sciences du sol et les microbiologistes, et de stimuler les discussions sur les contrôles mécanistiques du cycle de la MO des sols.
- La structure flexible de C-STABILITY est ouverte à de nouveaux développements pour explorer de nouvelles hypothèses mécanistiques (compétition des décomposeurs, limitation en eau et en nutriments, agrégation...) et soutenir la conception de futures expériences (sols "naturels", technosols, bioréacteurs...).

Un "toy model" puissant qui assemble les connaissances actuelles

- C-STABILITY tient compte (i) du **continuum de formes des polymères**, (ii) de la **diversité fonctionnelle microbienne**, (iii) processus clé du sol dans le cycle de la MO t.q. **l'accessibilité selective et la dépolymerisation des substrats**.
- La description de la chimie de la MO et de l'activité catabolique des décomposeurs est une force pour renforcer la compréhension des mécanismes de décomposition et de stockage.
- C-STABILITY est une plateforme permettant d'identifier les points de blocage des connaissances, d'accompagner les interactions entre les sciences du sol et les microbiologistes, et de stimuler les discussions sur les contrôles mécanistiques du cycle de la MO des sols.
- La structure flexible de C-STABILITY est ouverte à de nouveaux développements pour explorer de nouvelles hypothèses mécanistiques (compétition des décomposeurs, limitation en eau et en nutriments, agrégation...) et soutenir la conception de futures expériences (sols "naturels", technosols, bioréacteurs...).

Un "toy model" puissant qui assemble les connaissances actuelles

- C-STABILITY tient compte (i) du **continuum de formes des polymères**, (ii) de la **diversité fonctionnelle microbienne**, (iii) processus clé du sol dans le cycle de la MO t.q. **l'accessibilité selective et la dépolymerisation des substrats**.
- La description de la chimie de la MO et de l'activité catabolique des décomposeurs est une force pour renforcer la compréhension des mécanismes de décomposition et de stockage.
- C-STABILITY est une plateforme permettant d'identifier les points de blocage des connaissances, d'accompagner les interactions entre les sciences du sol et les microbiologistes, et de stimuler les discussions sur les contrôles mécanistiques du cycle de la MO des sols.
- La structure flexible de C-STABILITY est ouverte à de nouveaux développements pour explorer de nouvelles hypothèses mécanistiques (compétition des décomposeurs, limitation en eau et en nutriments, agrégation...) et soutenir la conception de futures expériences (sols "naturels", technosols, bioréacteurs...).

Et Capsis dans tout ça?

Pourquoi Capsis?

Objectifs généraux: s'adresser aux modélisateurs des écosystèmes forestiers pour

- contribuer aux travaux d'évaluation du cycle du C.
- impacts de la silviculture.
- contribuer aux réflexions sur la notion de fertilité des modèles de croissances et de production.

Travaux antérieurs

Développement d'une bibliothèque en Julia disponible sur GitHub:

<https://github.com/juliensaintemarie/C-STABILITY>

Etat actuel

- Bibliothèque java disponible dans `lib/capsis/cstability/`
- Documentation disponible

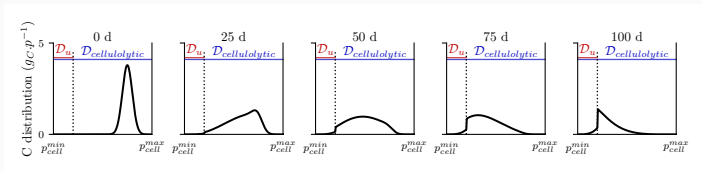
Travaux à venir

Développement du module `cstab`.

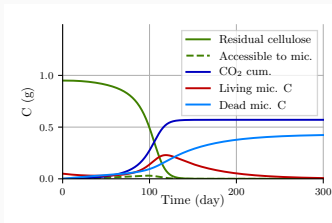
Merci pour votre attention

Sensitivity analysis

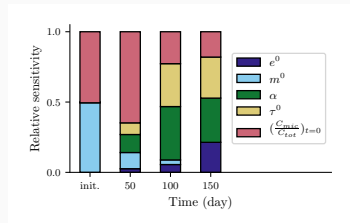
a Changes in cellulose polymerization distribution over time



b Changes in C stocks during cellulose degradation



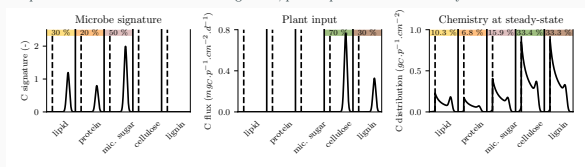
c Parameters affecting the amount of residual cellulose



C-STABILITY generates a distribution of the polymeric forms of decaying cellulose. Sensitivity analysis demonstrates that catabolic processes (reported by α and τ parameters) are sensitive regulators of SOM degradation.

Steady state

a Representation of microbe necromass signature, plant input and SOM at steady state



b Sensitivity analysis on the C stock at steady state, being $1.553 \text{ gC}\cdot\text{cm}^{-2}$ with the reference values

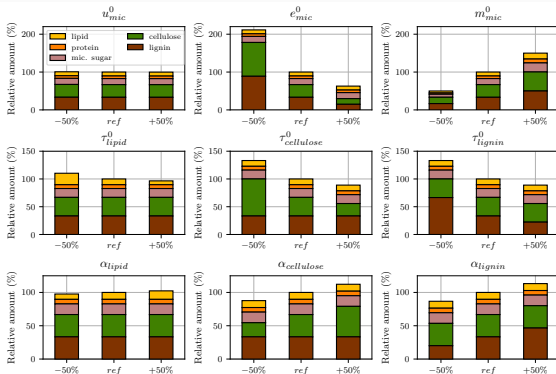


Table 1 Synthesis of C-STABILITY parameters and scenarios setups with values for initial conditions, microbes traits, and enzymes families. Scenario 1 corresponds to cellulose degradation, scenario 2 to lignocellulose degradation, scenario 3 to succession of two different microbial communities on lignocellulose, considering microbial recycling, and scenario 4 to soil organic matter at steady state considering a continuous plant input and microbial recycling, with only one microbial community. Initial amounts of microbes and substrate are respectively noted $(C_{mic})_{t=0}$ and $(C_{sub})_{t=0}$ mic. stands for microbe and sub. for substrate. For scenario 3, two μ_{mic}^0 values were tested to compare non-cheating and cheating behavior of decomposers. For scenario 4, the values of r_{enz}^0 were divided by 5 to account for in situ conditions, while other scenarios are based on laboratory case studies (Supplementary Table 1).

Parameter	Description	Unit
μ_{mic}^0	Microbial uptake rate per microbial carbon mass	$g\ C^{-1}\ d^{-1}$
e_{mic}^0	Microbial carbon use efficiency	–
m_{mic}^0	Microbial mortality rate	$g\ C^{-1}\ d^{-1}$
r_{enz}^0	Enzymatic action rate per microbial carbon mass	$g\ C^{-1}\ d^{-1}$
α_{enz}	Enzymatic substrate cleavage factor	–

Initial setup for each scenario								
Scenario	Microbes	Initial conditions (g_C)		Microbial signature			Plant biochemistry	
		$(C_{mic})_{t=0}$	$(C_{sub})_{t=0}$	Lipid	Protein	Mic. sugar	Plant sugar	Lignin
1	Plant decomposer	5	95	–	–	–	100%	–
2	Plant decomposer	5	125	–	–	–	76%	24%
3	Plant/mic. decomposer	5/5	125	30%	20%	50%	76%	24%
4	General decomposer	–	–	30%	20%	50%	76%	24%

Microbes parameters for each scenario								
Scenario	Microbes	e_{mic}^0	m_{mic}^0	μ_{mic}^0				
				Lipid	Protein	Mic. sugar	Plant sugar	Lignin
1	Plant decomposer	0.4	0.02	–	–	–	5	–
2	Plant decomposer	0.4	0.02	–	–	–	5	5
3	Plant decomposer	0.4	0.02	0/3	0/3	0/3	5	5
3	Mic. decomposer	0.5	0.01	5	5	5	0/3	0/3
4	General decomposer	0.4	0.02	5	5	5	5	5

Enzymes parameters for each scenario				
Scenario	Enzymes action	r_{enz}^0	α_{enz}	
1-2-3/4	Cellulolysis	1.8/0.36	5	
2-3/4	Lignolysis	1/0.2	7	
3/4	Lipidolysis	0.8/0.16	1.5	
3/4	Proteolysis	1.8/0.36	5.5	
3/4	Microbial sugar lysis	1.8/0.36	5	